



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

“INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN HORNO  
DE INDUCCIÓN POR  
RADIOFRECUENCIA PARA EL CRECIMIENTO  
DE CRISTALES ELECTRÓNICOS.”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO**

Q U E P R E S E N T A

SANDOVAL ESPINOZA HÉCTOR FERNANDO



DIRECTOR DE TESIS: ING. HÉCTOR LUIS DEL CASTILLO  
CODIRECTOR: M.I. JUAN CARLOS ROA BEIZA

México, D.F.

2006



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 esta 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.

## Agradecimientos

A mi madre María Eugenia, que no dejó de apoyarme antes y ahora, durante las vicisitudes, a pesar de lo difíciles que resultaron ella nunca me dejó sentirme solo. Por ser un ejemplo de responsabilidad. Por hacerme sentir orgulloso de mis logros.

A mi hermano Carlos Alberto parte importante de mi historia, con el que compartí gran parte de mis recuerdos infantiles y que supo escucharme cuando necesité de un hermano. Por hacerme saber que cuento con él.

A mis tíos: Alfonso, Rosana, Marco Antonio, Daniel, Berta, Guadalupe, José y Rosario por haber estado conmigo, haberme apoyado y dado un buen ejemplo.

A mis primos: Analí, Rosana, Daniela, Hugo Arturo, Alfonso, Ana Elizabeth, Lizel, David Alejandro, Marco Antonio, Sergio, Francisco, Montserrat, Ana y Carlos.

A las personas que conocí en el instituto:

- Ing. Héctor Del Castillo; por dirigirme y darme la oportunidad de hacer la tesis en el instituto de Física
- Dr. Enrique Camarillo; por toda la ayuda ofrecida y otorgada durante esta tesis.
- Sr. Raúl Espejel; por la asesoría brindada y por la amena charla.
- Dr. Héctor Murrieta; por el apoyo brindado dado a esta tesis y el apoyo en los trámites.
- M.C. Cristina Flores; por el apoyo durante mi estancia.

- Dr. José Manuel Hernandez

A mis compañeros y amigos:

Salvador Márquez, Alejandro Tonatiuh, Marco Antonio, Eduardo, Luis Mariscal, Alejandro Noguchi, Miguel González, etc.

A mis sinodales:

Los cuales fueron profesores en materias muy importantes en mi carrera

M.I. Juan Carlos Roa Beiza

M.I. Lauro Santiago Cruz

Dr. Pablo Pérez Alcázar

M.I. Juan Manuel Gómez González

A la UNAM por haberme aceptado y en ella terminar la carrera, a la Facultad De Ingeniería por ser el lugar donde comprobé mi vocación por la ingeniería y al Instituto de Física por haberme dado un lugar para mi desarrollo.

## INDICE

---

---

INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO I	
Introducción a los hornos de radiofrecuencia.....	9
1.1. Hornos eléctricos de radiofrecuencia.....	11
1.1.1. Calentamiento capacitivo.....	12
1.1.2. Calentamiento inductivo.....	13
1.2. Hornos de calentamiento por radiofrecuencia para el crecimiento de cristales.....	17
1.3. Consideraciones básicas.....	23
CAPÍTULO II	
Teoría electrónica del horno.....	27
2.1 circuito de la fuente de poder.....	27
2.2 circuito oscilador.....	31
2.2.1 Análisis de Kirchoff del oscilador.....	38
2.2.2 Características de funcionamiento de los osciladores en hornos de radiofrecuencia.....	42
2.3 Circuito de control de potencia.....	47
2.4 Circuito hidráulico del horno de inducción.....	60

2.5Círculo de control e interfaz con el operador.....	63
CAPÍTULO III	
Planteamiento del problema.....	68
CAPÍTULO IV	
Resolución de problemas y puesta en operación del horno.....	73
CONCLUSIONES.....	82
RESULTADOS Y SUGERENCIAS.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	86
APÉNDICE A.....	88
APÉNDICE B.....	92

## INTRODUCCIÓN

---

Primero comenzaré por definir y describir los materiales que son motivo de esta tesis: los cristales. Los cristales son actualmente materiales protagonistas en muchas ramas de la tecnología de la cual goza gran parte del género humano. Las aplicaciones pueden observarse en ciencias tan diferentes como son: la metalurgia, la medicina, la acústica, la navegación, la óptica, la electrónica, etcétera; las cuales se han visto beneficiadas con los progresos en la utilización de esos materiales. La tendencia actual es desechar los dispositivos electromecánicos y cambiarlos por componentes de estado sólido, por hacer estos un uso más eficiente de la energía (en la mayoría de los casos) tener menor desgaste y por ser altamente confiables por encima de los mecánicos o electromecánicos en casi todos los usos.

Esta tendencia es muy marcada en los sistemas actuales de almacenamientos de datos donde cada vez se usan lo menos posible los discos magnéticos, y ópticos (salvo por razones económicas) para darle preferencia a las memorias de tipo **flash** (relámpago) u otras de estado sólido.

En telecomunicaciones cada vez es más notorio el uso de fibras ópticas que permiten un gran ancho de banda de información con muchas ventajas, estos sistemas necesitan dispositivos de estructura cristalina para la manipulación de la información en forma de luz, destacando el uso extensivo que tiene el niobato de litio en estos dispositivos.

También los cristales han tenido mucha importancia en cuanto a la optomedicina; por la razón de que muchos de los nuevos sistemas de diagnóstico y de terapia los usan. Un ejemplo muy claro son los nuevos láseres

de estado sólido terapéuticos, con cada vez más variedad de usos; en cuanto a los dispositivos de diagnóstico se ven cada día más beneficiados por el uso de cristales como detectores.

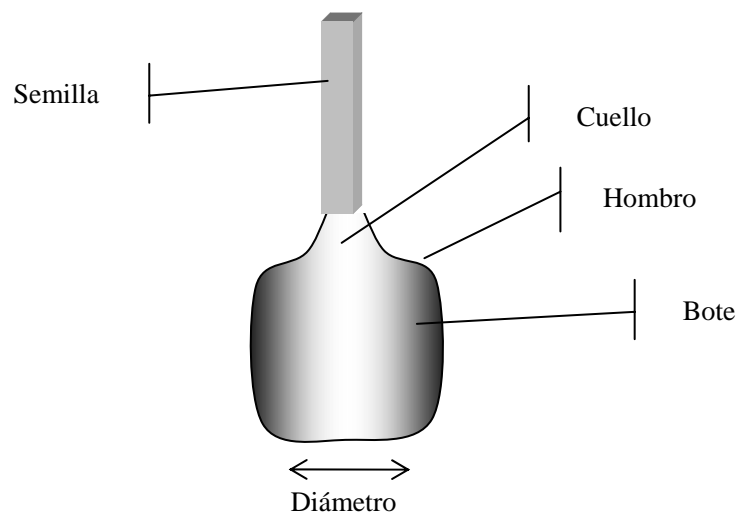
Los cristales son materiales que poseen una geometría molecular bien definida, que esta basada en un conjunto de celdas elementales.

Estos materiales (los cristales) no existen de manera natural aunque en ocasiones se hable de “cristales de roca”. Un cristal estrictamente hablando es una estructura de la que se describirán sus características en el apéndice A. Para obtener cristales con las características que se necesitan para la investigación se cuenta con varios métodos, todos estos científica y tecnológicamente probados, que requieren básicamente de un horno que sirva para fundir los materiales, tanto los que formen el cristal como las sustancias que actúan de agentes dopantes y se proporcione un ambiente limpio para evitar la contaminación de estos mismos materiales.

Desde hace mucho tiempo en otras universidades e industrias en el mundo se han estado utilizando para el crecimiento de cristales hornos de inducción. Estos son una de las alternativas más populares actualmente para crecer cristales porque en sí lo que se requiere, como se mencionará más detalladamente en el texto posterior, es un sistema calefactor que funda los componentes de los cristales, que los mantenga en una temperatura constante y precisa (con una tolerancia de alrededor de 1 °C) , que permita también la variación inmediata de la temperatura (es decir, que las modificaciones necesarias a la temperatura posean la menor inercia térmica de control posible) y que tenga un alto grado de confiabilidad durante todo el proceso de crecimiento, que regularmente requiere de muchas horas o días incluso, dependiendo de la velocidad de tiro (normalmente de magnitudes de pocos mm/hr ) y del tamaño del cristal que se quiera crecer.



La importancia de poder modificar rápidamente la temperatura durante el proceso se explica por el hecho de que durante el procedimiento de Czochralski se tienen que evitar al máximo los esfuerzos moleculares en el cristal por variación de temperatura. La variación de temperatura controlada por el usuario nos es útil para poder manipular el crecimiento de los cristales porque es necesario que exista variación controlada que nos permita modificar el diámetro, y por consiguiente, nos de las facultad de desarrollar las partes que se distinguen del cristal. Estas partes se pueden ver en la figura I.1:



**Figura I.1. Partes constitutivas de un cristal crecido por el método Czochralski**

El grupo de propiedades ópticas del Departamento de Estado Sólido del Instituto de Física se ha dedicado al crecimiento de cristales y a estudiar los procesos inherentes a su crecimiento, más recientemente han incursionado en el llamado dopaje de los cristales; es decir, agregar sustancias como el germanio y el cromo de manera controlada en el fundente que formará el cristal. Este procedimiento es bien conocido en la ciencia de materiales porque es el método que nos permite obtener semiconductores de región tipo P y de región tipo N, que son clave para obtener algunos de los más importante dispositivo de la electrónica de estado sólido como son el diodo, el transistor de unión bipolar, el DIAC, el tiristor y el TRIAC, etc. En el caso de los cristales

crecidos en el Departamento de Estado Sólido se aplica el método Czochralski para crecer cristales dopados con el objeto de cambiar el medio donde se hará reaccionar los elementos dopantes, lo que resultará en un cristal que tendrá por estas razones propiedades ópticas diferentes a las de los no dopados. Dichas propiedades son estudiadas por el grupo de investigación antes mencionado. Con este fin se adquirió un horno de inducción marca Stanelco, el cual aunque cuenta con un instructivo, que es muy general y breve. Por esta razón hay muchas partes del funcionamiento del horno que dicho instructivo no menciona y que es necesario saber, entonces el objetivo de esta tesis es estudiar el funcionamiento de los circuitos eléctricos, la operación del equipo y del módulo con que cuenta, para posteriormente usarlo para crecer cristales.

En estos momentos el departamento cuenta con un horno de calefactor eléctrico (efecto Joule), cuyo elemento de caldeo es un tubo de carburo de silicio que maneja potencias de 1 KW, aproximadamente, y se alimenta por una línea bifásica. Este sistema ha probado su efectividad desde hace tiempo, tanto así que se está a punto de poner en operación una versión mejorada del mismo, con el mismo método calefactor. Este horno usa también el método Czochralski para crecer cristales

¿Porqué un horno de inducción? El funcionamiento de un horno de inducción facilita grandemente la implementación de las condiciones para crecer cristales, por el hecho de que puede alcanzar altas temperaturas sin tener contacto directo con el material a fundir ni con el crisol, con la ventaja de que se sortea la contaminación por partículas emanadas del horno hacia el material que formará el cristal, como puede pasar en ocasiones en el horno de efecto Joule. Además tiene una baja inercia térmica de control, una gran flexibilidad en cuanto a configuraciones se refiere y la facilidad de poder observar el procedimiento en todo momento, etc. Esto aunado a que el horno de inducción con que se cuenta incluye una plataforma, que tendrá que ser adaptada a las condiciones específicas en las que se encuentra nuestro horno y un módulo especial de control de tiro y rotación para el crecimiento de cristales, el cual

también habrá necesidad de explicar. Entre sus desventajas se encuentran: tener un circuito tanto electrónico como hidráulico de enfriamiento mucho más complicado y exigente que el horno de efecto Joule y requerir de mucha más potencia de alimentación para ser útil en este caso 52 KW.

Esta tesis constara de 4 capítulos que abarcaran lo mejor posible los temas para un mejor dominio del tema.

El capítulo I explicaré primero como funciona el horno tipo calefactor actualmente utilizado para el crecimiento de cristales mediante el método Czochralski, incluyendo sus ventajas y desventajas, y a continuación lo que es un horno de inducción por radiofrecuencia, explicando los pros y contras con que cuentan los tipos de hornos de crecimiento de cristales que existen, las ganancias con las que esperamos contar al instalar el horno y crecer cristales con él por sobre el horno de efecto Joule. Se abordará los tipos de calentamiento por inducción, cuales son sus características y usos más frecuentes. También se describirá el método utilizado para el crecimiento (el procedimiento de Czochralski) y como se ocupará el horno de inducción para llevarlo a cabo.

En el capítulo II analizaré de qué manera el sistema transforma una corriente alterna trifásica de 440 V entre líneas, de 60 Hertz, en una señal de radiofrecuencia de 365 KHz con una potencia efectiva de 30 KW, además se estudiará también el funcionamiento del circuito de control de potencia, el cual le permitirá al operador establecer la temperatura que alcanzará el material sometido a la radiación del horno.

El capítulo III describirá los problemas que involucran el uso del horno desde su instalación, alimentación eléctrica e hidráulica, y la puesta en marcha. También se describirán los problemas concernientes a los módulos de crecimiento de cristales y el pedestal.

El capítulo IV explicaré cuales son los pasos necesarios para resolver los problemas mencionados en el capítulo anterior y las etapas finales de la puesta en operación.

Para finalizar se dan las conclusiones de todo lo que se ha tratado durante la tesis y a continuación algunas sugerencias para el mejoramiento a futuro del sistema, el cual tiene mucho potencial.

Después agregué la bibliografía y las referencias sobre las cuales se fundamentó esta tesis

Como colofón de este trabajo se anexan algunos apéndices basados en textos originales de miembros del Instituto de Física que explican las cuestiones relativas a la teoría de la materia cristalina y las cuestiones de cristalogénesis con el método Czochralski. Este último método de crecimiento es el más usado dentro del departamento por ser confiable y obtener los mejores resultados.

### **Niobato de Litio**

Uno de los materiales que más se usa en el departamento de Estado Sólido para formar cristales es el Niobato de litio ( $\text{Li}\cdot\text{NO}_3$ ) impurificado (dopado) con diversas sustancias, como pueden ser el Cromo  $\text{Cr}^+$  o el Germanio  $\text{Ge}^+$ . El Niobato de Litio tiene características muy útiles en el campo tanto de la electrónica como de la óptica, como ejemplo el bien conocido uso en filtrado de señal en televisiones y videocaseteras, es cada vez los usos que se le encuentran en modulación para optoelectrónica en dispositivos DWDM, **Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación de división de longitud de onda densa)** en sistemas de fibra óptica. Se ha investigado mucho este material en años recientes, con 6,500 publicaciones desde que el primer libro sobre el Niobato de litio que fue publicado en 1989<sup>^</sup>

---

<sup>^</sup> Tomado del libro Niobate lithium en la bibliografía

Esto ha llevado al niobato de litio a ser uno de los materiales más utilizados para formar cristales junto con el silicio y el cuarzo.

## CAPÍTULO I

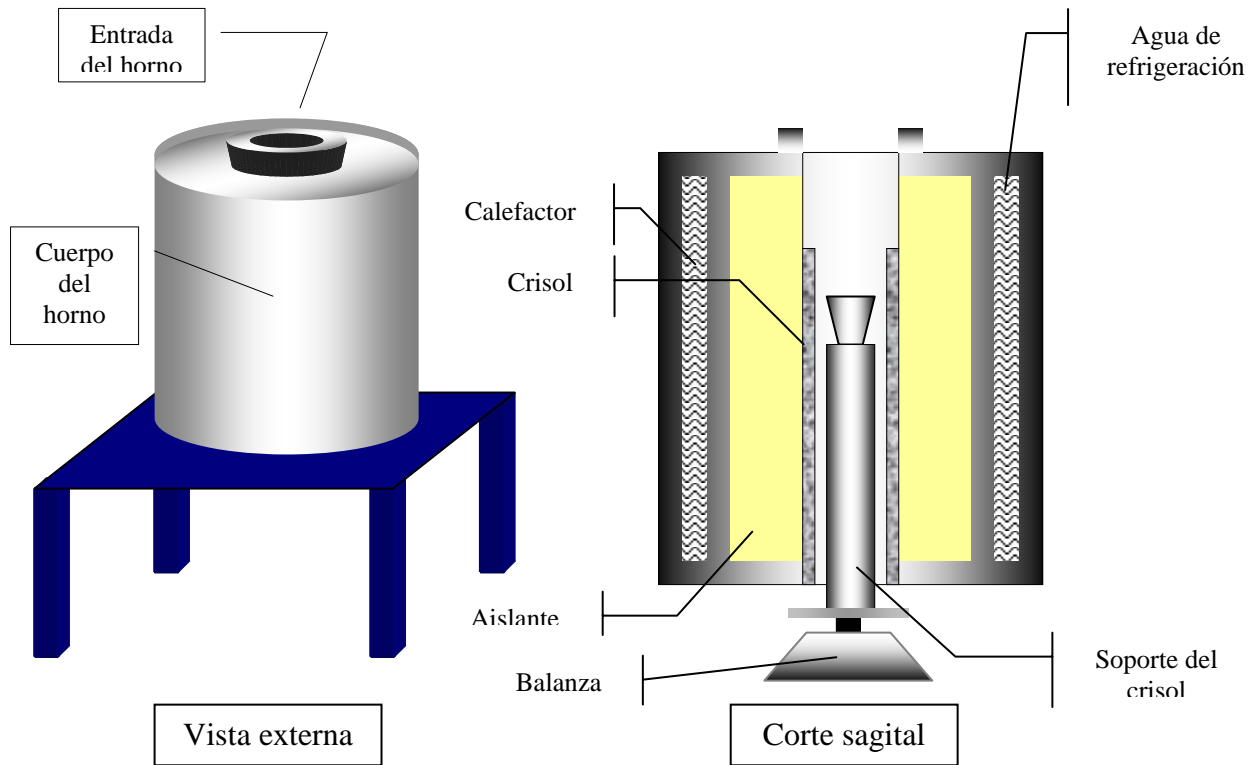
### INTRODUCCIÓN A LOS HORNOS DE RADIOFRECUENCIA

---

Hasta el momento en el que escribí esta tesis los tipos principales de hornos para crecimiento de cristales que se usan son de dos tipos: el horno de elemento calefactor eléctrico (efecto Joule) y los hornos de radiofrecuencia, que son los que competen a esta tesis.

El horno de elemento calefactor (que es con el que cuenta en estos instantes el Instituto) es básicamente un tambor de acero inoxidable construido con láminas de 1/16 de pulgada de espesor en el cilindro y de 1/8 en las tapas, con cavidades entre las camisas por las que debe fluir agua que mantiene constante la temperatura. Asimismo, está relleno con una espuma de un material refractario apartado completamente del agua de enfriamiento, de manera que quede una cavidad cilíndrica donde se pueden alojar el calefactor y el crisol, siendo ambos también cilíndricos. El crisol está fabricado de platino, un metal que tiene las características necesarias en cuanto a dureza, al igual cuenta con un alto punto de fusión y que no presenta reacción química, ni con la atmósfera, ni con el niobato de litio fundido. Por otra parte, el calefactor está fabricado de carburo de silicio, un material semiconductor que soporta muy bien la temperatura de trabajo, su resistencia eléctrica es igual a 4.4 Ohms cuando es sometido a 220 VAC y puede elevar la temperatura del crisol a 1,500 °C, con esta temperatura el niobato de litio se funde y queda listo para trabajar con este. Un esquema del horno se puede ver en la figura 1.1

El control de la temperatura se realiza básicamente con un TRIAC que mediante un pulso de bajo voltaje generado por el control, permite el paso de la corriente alterna durante ciertos intervalos lo que limita la potencia suministrada a la resistencia que es lo que se busca. La figura 1.2 muestra la forma de la señal que alimenta la resistencia.

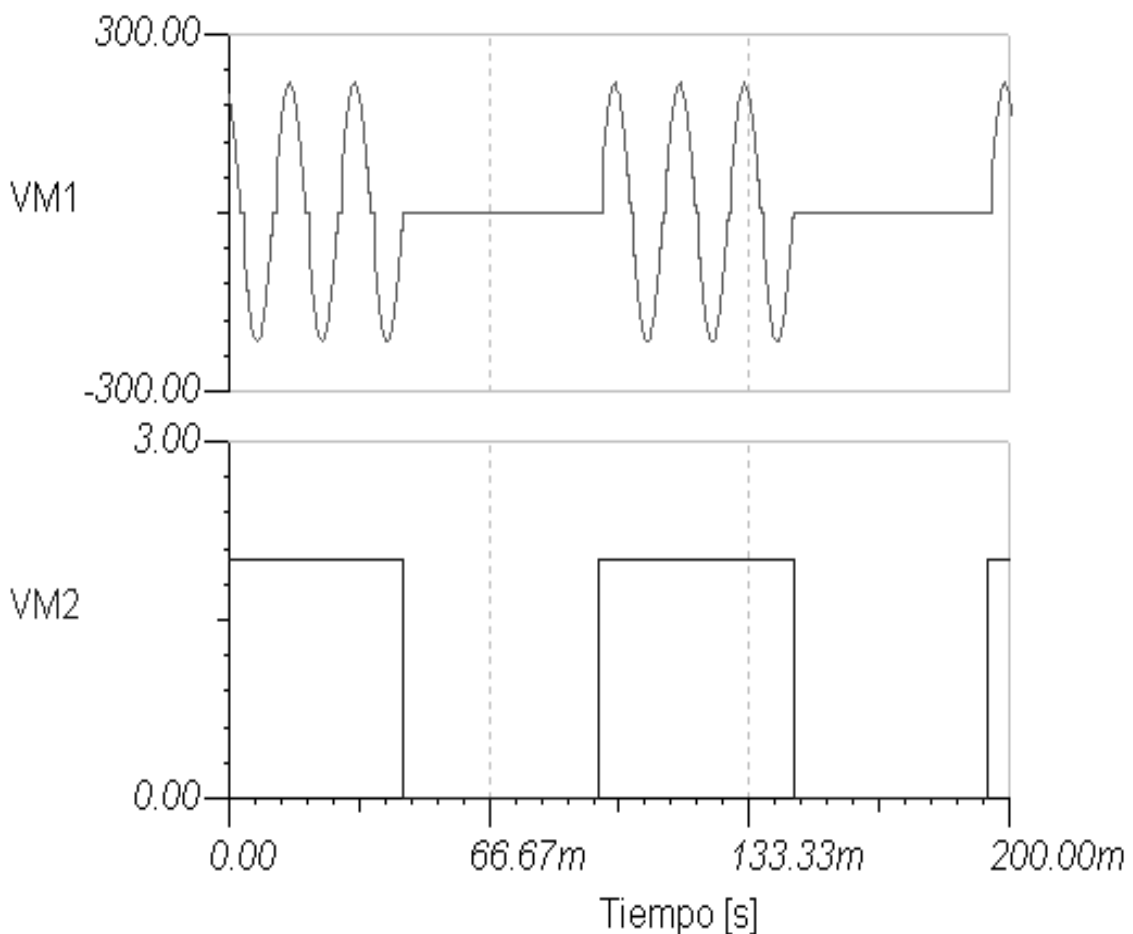


**Figura 1.1. Esquema del horno de calefacción por efecto Joule**

El TRIAC debidamente implementado con sus circuitos auxiliares necesarios, es controlado por un módulo de control de temperatura marca **EuroTherm**, que ya fue calibrado y que permite modificar la temperatura de manera programada, mediante programación de rampas crecientes y decrecientes de potencia (la señal eléctrica controlada se puede ver en la figura 1.2) que nos da la ventaja de poder amortiguar los cambios de temperatura a la que se vera sometido el material mientras esta en la cavidad del horno. Un diagrama electrónico simplificado del circuito que controla la energía suministrada a la resistencia de carburo de silicio, es el mostrado en la figura 1.3.

Este tipo de horno, comparado con el horno de inducción tiene la ventaja de que es más eficiente eléctricamente hablando, sus circuitos son más sencillos,

no afectan inductivamente su entorno y su circuito hidráulico es mucho más sencillo con un flujo mucho menor. Las desventajas son: la potencia es limitada, es muy rígido en cuanto a los tipos de configuraciones que se pueden hacer, porque al horno de inducción se le pueden dar distintos usos tanto en la industria como en los laboratorios con adaptaciones sencillas, situación que es mas complicada o imposible en el horno de efecto Joule; y también, existe la posibilidad en el caso particular del crecimiento, que el sistema calefactor desprendiera partículas que contaminen la mezcla de sustancias que forman el cristal.

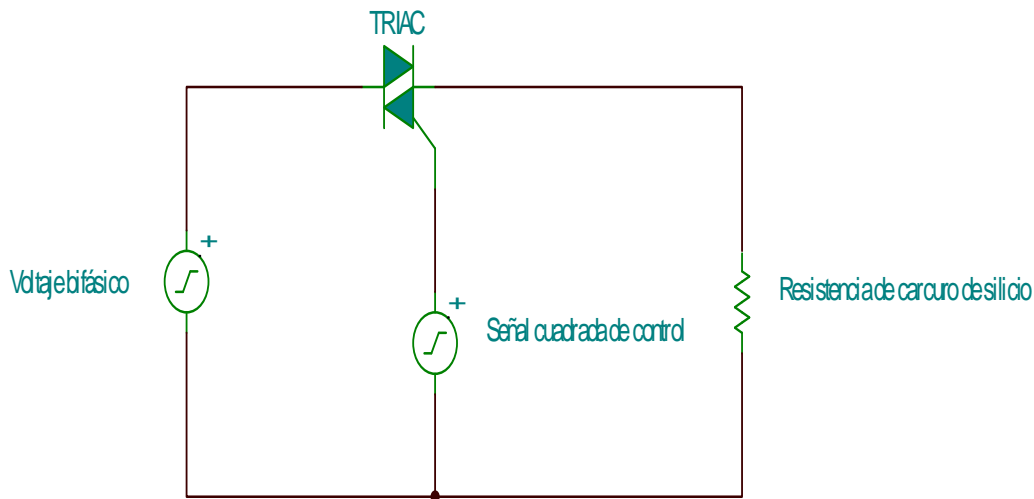


**Figura 1.2. Señal que alimenta el calefactor del horno de efecto Joule.**

### **1.1. Hornos Eléctricos de radiofrecuencia**

En cuanto a los hornos eléctricos de inducción existen dos tipos: El capacitivo y el inductivo, los cuales explicaré a continuación.





**Figura 1.3. Diagrama electrónico del circuito de potencia del horno de efecto Joule.**

### 1.1.1. Calentamiento capacitivo

Este tipo de calentamiento es el más efectivo cuando se trata de calentar materiales dieléctricos. Funciona creando un campo eléctrico bastante intenso, del orden de los kilovolts y de elevada frecuencia, el cual llena el espacio existente entre las placas de un capacitor donde se ha puesto de antemano el material. Los átomos del mismo se comportan como pequeños dipolos, por lo tanto cada átomo absorbe parte de la energía aplicada al efectuarse el desplazamiento de electrones respecto de los núcleos debido al campo eléctrico variable aplicado. En el caso de materiales polares también contribuye al calentamiento la fricción molecular debida al cambio de orientación que ocurre bajo la acción de campo eléctrico aplicado.

En este tipo de calentamiento existe más eficiencia a frecuencias elevadas, la potencia disipada también es proporcional al volumen, al cuadrado del potencial eléctrico y a otros factores como puede verse en la siguiente expresión:

$$Pd = \frac{\epsilon_1 E^2}{4\pi} \cdot V_w \cdot \omega \cdot \tan \delta \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

$\varepsilon_1$  = constante dieléctrica del material

E= campo eléctrico aplicado (valor pico)

$V_w$  = Volumen del espécimen.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$\tan \delta$  = Factor de potencia del material

En la ecuación 1.1 podemos ver que la potencia depende en proporción directa a la frecuencia como se dijo arriba.

El voltaje de radiofrecuencia se aplica entonces en los extremos del capacitor formado por el tipo de material que se esté procesando, se debe considerar que algunos materiales soportan de 3kV a 4kV por cm. sin perforarse, mientras que otros se perforan a unos cuantos cientos de volts por cm. Una vez fijado el valor del campo eléctrico aplicado y el volumen de la pieza bajo proceso, la única posibilidad de incrementar la potencia disipada es aumentando la frecuencia, como puede verse en la ecuación 1.1

El factor de potencia de un dieléctrico polar resulta muy elevado para ciertas combinaciones de temperatura y frecuencia, debido a la absorción resonante de energía. En casos como éste se puede trabajar cerca de la frecuencia apropiada con el fin de economizar energía.

### **1.1.2. Calentamiento inductivo**

Se utiliza para el calentamiento de materiales conductores. Este método, que es el aplicado al horno en el cual se fundamenta esta tesis, se basa en el movimiento de los portadores de carga en el volumen de un conductor bajo la acción de un campo electromagnético variable, este efecto está ilustrado en la figura 1.3. La potencia total absorbida está dada por la fórmula  $RI^2$  [Watts] (donde R es la resistencia del conductor en ohms e I es el flujo de corriente inducida dentro del material en amperes) durante este movimiento es la que

genera calor. En materiales ferromagnéticos también contribuye el ciclo de histéresis.

Los hornos eléctricos de inducción son empleados con mucha frecuencia en la industria del acero siendo su funcionamiento es muy parecido a la forma como se induce calor en el crisol, y por consiguiente en el cristal en crecimiento; en este caso se usa una frecuencia de 1,000 Hz que induce calor dentro de un crisol lleno de chatarra o viruta de acero. La inducción se consigue mediante una bobina refrigerada por agua, de manera que actúe como primario de un transformador y el contenido del horno actuará como secundario del transformador, induciendo una gran corriente en el material contenido en el crisol, lo que provocará en consecuencia una elevada temperatura capaz de fundir el metal. Este tipo de calentamiento depende en proporción directa de la frecuencia porque la profundidad de penetración del campo es función de ella. Esta propiedad de penetración variable con respecto a la frecuencia se utiliza cuando se quiere templar solamente la superficie de la pieza, que es donde se efectúa la fricción, porque el templado incrementa la dureza y la fragilidad al mismo tiempo, es por este incremento en la fragilidad que no se temple en todo su volumen, el temple superficial aumenta grandemente la durabilidad de la pieza. Esta característica de calentamiento propia habrá de tomarse en cuenta a la hora de usar el horno para calentar el crisol y su contenido, aunque en términos prácticos nos va a ser más importante la potencia promedio que absorberá y nos bastará saber la temperatura final que se puede inducir en el crisol.

Es por lo antes mencionado que dependiendo el caso es provechoso utilizar un horno de radiofrecuencia para lograr un templado controlado. Otro ejemplo ilustrativo de esta acción del horno sobre los materiales es cuando existe la necesidad de pulir algunas piezas metálicas a las cuales se le necesita dar cierto brillo (engranes, poleas, etc.). Es conveniente contar con una manera de calentar sólo la superficie sin quitarle a las piezas el templado cuando se les da por completo (en todo su volumen). Si este calor no es sólo superficial se corre el riesgo de perderse el templado dado y se dejaría la pieza débil lo que derivaría en su posible deformación; en este caso se escoge una

frecuencia elevada para tener un calentamiento superficial en corto tiempo y poder pulir únicamente la superficie, logrando de esta manera evitar eliminar el templado y resolver el problema.

A frecuencias bajas la profundidad de penetración es mayor y la pieza se calienta más uniformemente, es decir hasta su interior, lo cual puede convenir para el templado total o fundición que es lo que se busca en nuestro caso particular, por lo tanto la frecuencia de oscilación escogida depende de la clase de trabajo que piensa efectuarse.

La profundidad de penetración puede calcularse teóricamente usando el comportamiento de una onda electromagnética monocromática plana. La ecuación 1.2 muestra el comportamiento de dicha onda a lo largo del eje "X" por ejemplo en un medio conductor es:

$$\bar{E}(x, t) = \bar{E}_0 \cdot e^{j(\alpha x - \omega t)} e^{-\beta x} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde:

$\bar{E}$  = Amplitud del campo eléctrico en la superficie del conductor, en volts-m

$$\alpha = \beta = \left( \frac{\omega \cdot g \cdot \mu}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$\mu$  = Permeabilidad del material en Ohms

$e$  = Base del logaritmo neperiano

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$f$  = Frecuencia en Hertz

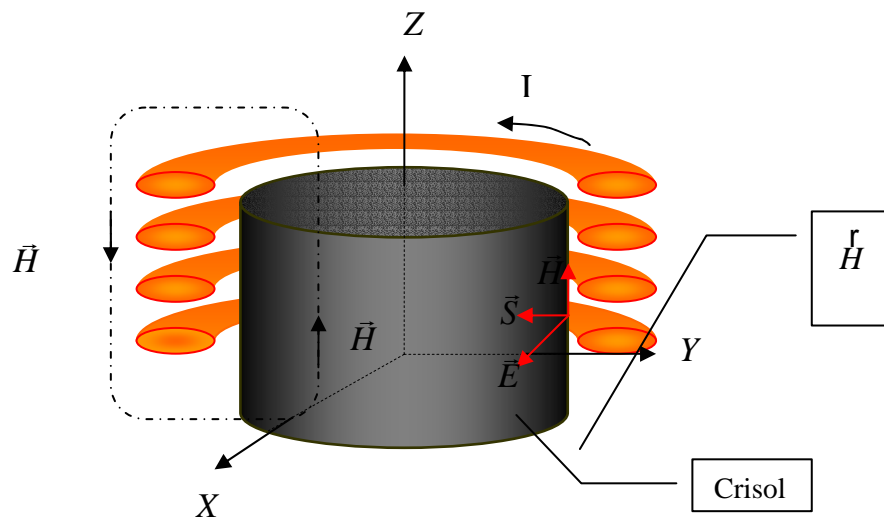
$g$  = Conductividad efectiva del material. En Siemens

Esta intensidad de campo eléctrico dividida entre la resistividad total del material nos da la densidad de corriente inducida representada en la ecuación 1.3:

$$\bar{I}(x, t) = \bar{I}_0 e^{-\beta x} \cdot e^{j(\alpha x - \omega t)} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

$i_0$  = Densidad de corriente en la superficie del material. En Amperes/cm<sup>2</sup>.

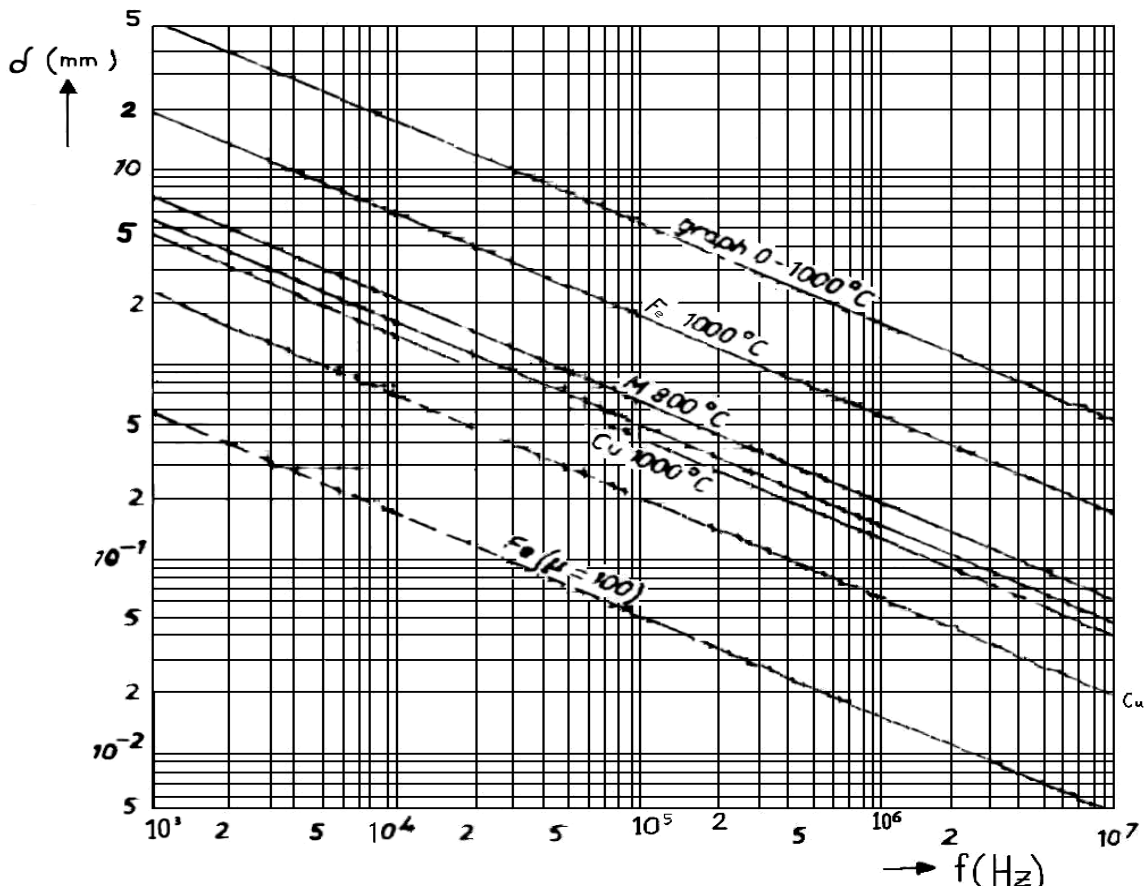


**Figura 1.3. Acción de un campo electromagnético sobre el material conductor**

El término  $1/\beta$  se define como la profundidad de penetración de la onda, que se expresa algunas veces como  $\delta$ , y corresponde a la profundidad a la cual la corriente disminuye por un factor de  $1/e$ . Se concluye entonces que la profundidad de penetración es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. En la figura 1.4 se puede ver la profundidad de penetración de algunos materiales como el cobre, el hierro, el magnesio o el grafito, en función de la frecuencia.

El intervalo de frecuencia más común para este tipo de calentamiento es de 1 KHz. a 10,000 KHz.

También puede verse en la misma expresión 1.2, que la densidad de corriente inducida es máxima en la superficie y disminuye exponencialmente a medida que penetra radialmente al conductor. En la figura 1.5 puede verse la disminución exponencial de la densidad de corriente a medida que se penetra radialmente en el conductor.

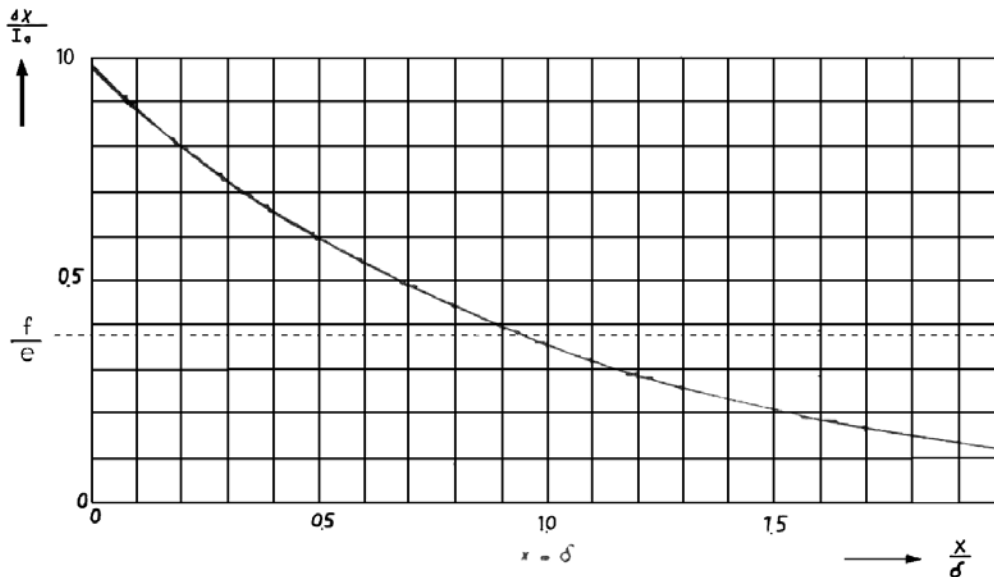


**Figura 1.4.** Gráfica donde se observa la profundidad de penetración en relación con la frecuencia y el tipo de material.

## 1.2. Horno de calentamiento por radiofrecuencia para el crecimiento de cristales

Ventajas del calentamiento por inducción. En el subcapítulo anterior hice notar algunos de los usos exclusivos del calentamiento inductivo, como en el caso de templados superficiales de materiales. También hay que mencionar que el calentamiento inductivo es limpio, eficiente, rápido, flexible, con una baja inercia térmica de control, y la aplicación de calor puede ser realizada con precisión y de forma confiable. Esta última característica es importante porque en el método Czochralski para el crecimiento de cristales, que se emplea ampliamente en el grupo de investigación, una de las condiciones es fundir el material a alta temperatura dentro de un crisol de tal manera que se vuelva un líquido con una cierta viscosidad y la otra es poder variar la

temperatura algunos grados arriba o debajo de la temperatura de fusión del material, para controlar el crecimiento.



**Figura 1.5. Gráfica donde se observa la profundidad de penetración contra la frecuencia de la radiación electromagnética.**

Además se debe garantizar la pureza del ambiente donde se aloja el crisol y un gradiente de temperatura estrictamente sostenido, condición sin la cual no se puede formar un cristal. Para obtener el máximo beneficio del uso del calentamiento por inducción es necesario tener bobinas de trabajo (las bobinas por donde la señal de radiofrecuencia induce el calor) bien diseñadas, en el caso del horno perteneciente al departamento se cuenta con la bobina cilíndrica que viene incluida con el aparato la cual tiene la altura y diámetro más conveniente para contener un crisol, dichas dimensiones son 9 cm. de altura y 12 cm. de diámetro con estas medidas cabe perfectamente por su diámetro en el módulo con pedestal del horno y además sus espiras son huecas para que pueda circular agua de enfriamiento por su interior.

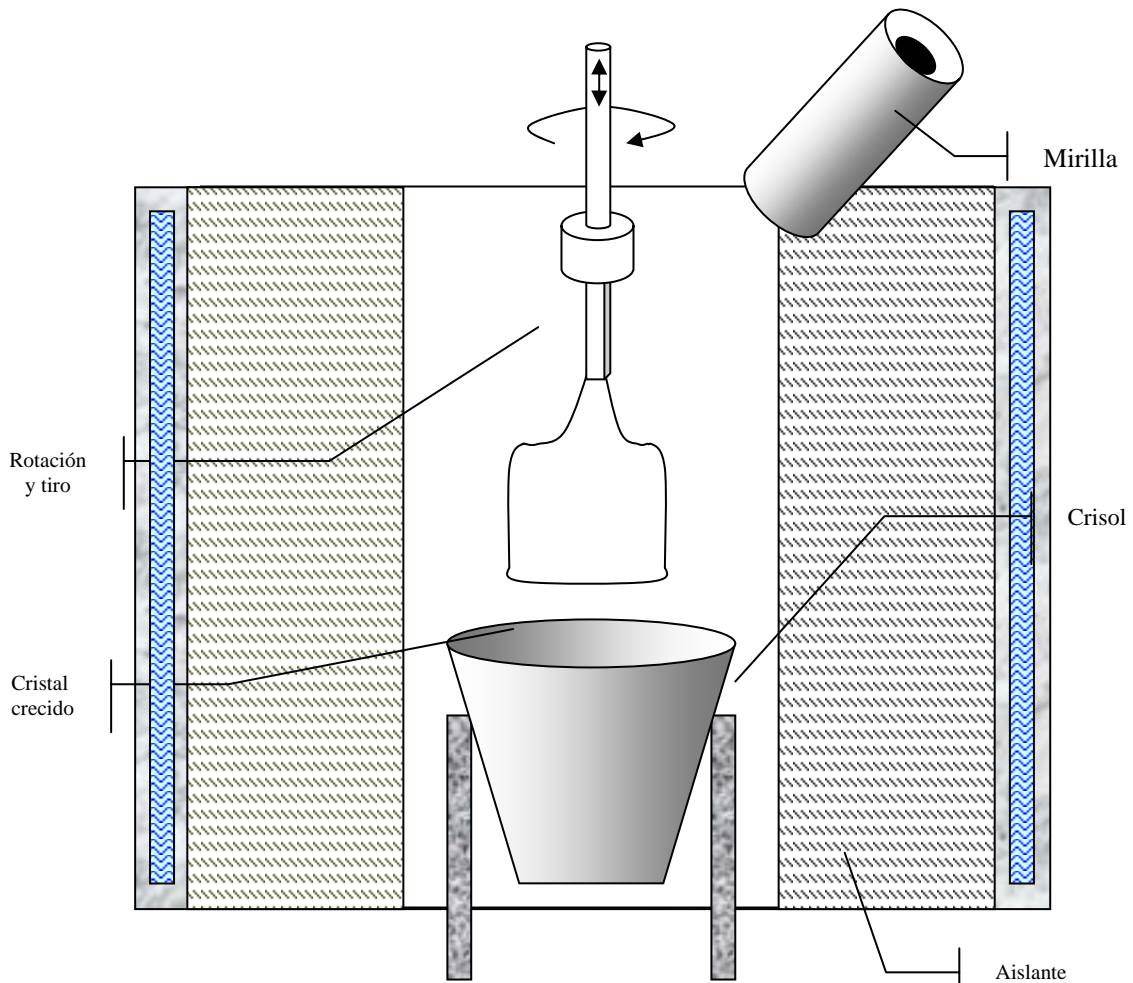
En estos momentos el horno de crecimiento de cristales con que cuenta el departamento es un horno con un calefactor eléctrico que usa el método de crecimiento de Czochralski, su funcionamiento es muy efectivo ya que ha servido para crecer varios cristales de distintos tamaños, que cumplen en la mayoría de los casos, con todos los parámetros que debe cubrir un cristal como son el que sus moléculas se encuentren acomodadas en una estructura

molecular básica que se le llama celda o ladrillo elemental de construcción, con características propias y exclusivas de cada material a crecer, esto se aclara porque puede ocurrir que por lo delicado del procedimiento en general, que esta supeditado a factores externos como es el suministro de agua y de energía eléctrica, y a otros factores imprevisibles los cristales no posean la estructura buscada en todos los sectores. El inconveniente de este horno es que el sistema calefactor-crisol formado por el aislante térmico que es espuma de alumina y el calefactor fabricado de carburo de silicio, existe la posibilidad de que alguno de ellos desprenda partículas que pueden contaminar la sustancia y arruinar el cristal, debido a que la estructura cristalina requiere una gran pureza en los materiales que los conforman para garantizar la geometría del material y su periodicidad, cualquier falla en algún sector del cristal formaría un policristal, que es un cristal no homogéneo con una geometría diferente a la buscada y se considera totalmente inútil, lo cual conlleva al desperdicio de material, energía y esfuerzo humano.

En cambio, en un horno de crecimiento de cristales de radiofrecuencia se pueden hacer diferentes configuraciones, con las ventajas propias de cada una de ellas, de esta manera en algunos casos, dependiendo del compuesto, se puede ver como el cristal crece frente al operador y a su vez observar las condiciones físicas en las que crece el cristal, simplemente transportando la radiofrecuencia mediante guías de onda a donde fuera necesario o poniendo la bobina de trabajo donde al usuario convenga, puesto que durante el procedimiento de crecimiento de cristales por Czochralski dentro del crisol se pueden observar distintos fenómenos físicos como son el ver un anillo luminoso en la superficie derretida del material de diferente color al resto de la superficie y ver el menisco donde se está formando el cristal, es importante que el usuario tenga oportunidad de observarlos, actualmente con el horno de calefactor eléctrico estos fenómenos se observan desde una mirilla y se logran ver con mucha dificultad por periodos de tiempo cortos debido a la elevada temperatura del interior del horno 1,300 °C @ 1,500 °C con el horno de inducción se podrá ver todo el procedimiento porque se podrá evitar el uso de una cavidad aislada y con cierta estanqueidad y al no ser



afectado el crecimiento por la luz se podrá ver a simple vista. Además otra gran ventaja es que el sistema presenta una inercia de control térmico baja.

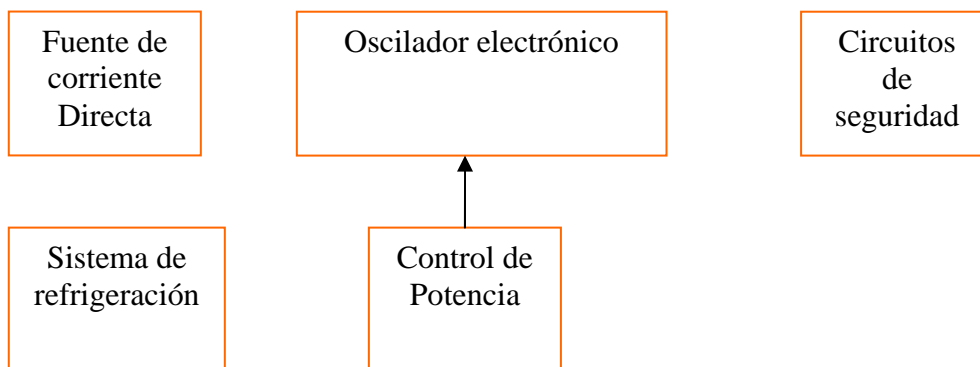


**Figura 1.6. Esquema que muestra el crecimiento de un cristal dentro del horno de efecto Joule por el método Czochralski.**

Esta última ventaja del horno de radiofrecuencia que se va a instalar es una de las más importantes sobre el otro horno de crecimiento, porque es muy común que durante el procedimiento de crecimiento de cristales haya variaciones indeseadas de temperatura que al querer corregirlas haya un periodo relativamente largo de espera mientras se llega a esa temperatura, debido a que el horno cuenta con muchas estructuras (tina, tapa, pedestal, aislante, crisol, etc.) que nos impedirán el cambio inmediato de temperatura, este fenómeno ejerce varios tipos de esfuerzos mecánicos a nivel molecular sobre la estructura cristalina lo que puede ocasionar un sector policristalino (Conteniendo diferentes tipos de geometría dentro del cristal) que es inútil porque lo que se busca es homogeneidad geométrica tridimensional en todos

los sectores del cristal. Con el horno de radiofrecuencia estos periodos se acortan al haber menos componentes que acumulen calor porque sólo serían crisol y el cristal y por la enorme potencia que es capaz de inducir en corto tiempo.

El horno de radiofrecuencia cuenta con distintos módulos, estos se muestran en la figura 1.6



**Figura 1.6. Diagrama de bloques del horno de inducción**

- a) Fuente de corriente directa: es el modulo que se encarga de cambiar la corriente alterna trifásica de 440 V a 7.5 KV de corriente continua que es la necesaria para polarizar el ánodo del bulbo oscilador, para conseguir esto el sistema cuenta con un arreglo de resistencias y capacitores conectados en estrella (Y) que filtran el voltaje de entrada, a continuación pasa a un transformador trifásico Delta/estrella ( $\Delta$ -Y) con una relación de bobinas dependiendo del voltaje de alimentación, con esto se eleva el voltaje que después pasa a un puente de diodos de potencia que la rectifican y alimentan el circuito oscilador.
- b) Circuito oscilador: el circuito oscilador es relativamente sencillo en su principio básico, consta de un bulbo tríodo como elemento de amplificación con capacitores, resistencias y bobinas. Como es sabido para que un circuito presente oscilación deben presentarse :

1. Un circuito retroalimentado con desfaseamiento igual a  $0^\circ$  alrededor del lazo de retroalimentación (retroalimentación positiva)
2. y que la ganancia de voltaje alrededor del lazo de retroalimentación es igual a la unidad (1).

La ganancia de voltaje alrededor del lazo cerrado de realimentación es  $A_{cl}$  es el producto de la ganancia del amplificador  $A_v$  y la atenuación del circuito de realimentación  $B$ , esto se representa en la ecuación 1.4.

$$A_{cl} = A_v \cdot B \quad \text{Ecuación 1.4}$$

En el siguiente capítulo analizaré con más profundidad todos los circuitos electrónicos del aparato.

- c) Sistema de refrigeración: consta de un sistema de cambiadores de calor, radiadores, ventiladores y tuberías. Todo esto en conjunto sirve para mantener una temperatura de trabajo nominal de  $210^\circ\text{C}$  en el triodo del oscilador, mantener la temperatura de la bobina del inductor de calor, expulsar el calor generado en el oscilador y el sistema en general.
- d) Circuito de control de potencia: esta formado por dos amplificadores operacionales dentro del módulo 30-1600 **M.B.T. Controller (Controlador)** como elementos centrales de control, que explicaré más a detalle en el siguiente capítulo. A grandes rasgos se trata de un control de potencia de tres etapas: la primera es un comparador proporcional-inversor que compara la señal de salida del inductor con media rectificación, con la señal del divisor del voltaje que forma la resistencia variable VR1 , la segunda etapa compara la salida de la primera etapa con un voltaje de corriente directa que es el voltaje de alta tensión (HT) después de ser dividido en voltaje con el modulo 30-

1668, la tercera etapa de control es la de potencia en sí, formada por varios transistores tipo NPN de distintas potencias que cambian el voltaje de placa del bulbo diodo PY500A para que este, a su vez cambia el voltaje de entrada (reja-cátodo) del bulbo principal del oscilador, permitiendo controlar su potencia.

- e) Circuitos de seguridad para el arranque y el apagado. consiste en un conjunto de relevadores, contactores magnéticos, sensores, luces, galvanómetros en distintas configuraciones, etc. Estos dispositivos tienen la misión de mantener el sistema dentro de los límites seguros y de controlar el arranque, el apagado, el apagado súbito (en emergencias) y actuar en caso de sobrecalentamiento del aparato, que como ya se dijo tiene potencia de 30 KW de salida, lo que implica que dentro del aparato maneja todavía más potencia en radiofrecuencia lo que puede ser extremadamente peligroso para el usuario porque la radiofrecuencia induce calor en los seres vivos, provocando rápidamente quemaduras y daños profundos en los tejidos vivos. Todos estos dispositivos se encargan de proteger diferentes aspectos dentro del aparato existen fusibles magnéticos que se encargan de apagar el aparato en caso de sobrecarga, existe una válvula eléctrica que corta el paso de agua al bulbo principal, otra válvula eléctrica que corta el paso de agua hacia el circuito Oscilador (circuito tanque), otro interruptor que apaga el bulbo oscilador en caso de sobrecalentamiento, también existen dentro de los diferentes circuitos fusibles que protegen el sistema de corrientes elevadas, al igual hay un interruptor térmico que apaga todo el sistema en caso de un sobrecalentamiento dentro del gabinete que aloja el sistema y otro interruptor térmico que protege el ventilador trifásico del sistema en caso de sobrecalentamiento.

### **1.3. Consideraciones básicas**

El horno de inducción por radiofrecuencia fabricado por Stanelco es usado en otras numerosas aplicaciones tanto industriales como también científicas, por ejemplo:

- Templado de herramienta
- Templado superficial de herramientas
- Fundición de materiales
- Platear superficies
- Pulir cristales
- Soldar componentes

Y es útil en otros usos donde se requiera focalizar el calor de una manera rápida y limpia. En nuestro caso particular lo más importante de lo anterior es que sea un calentamiento limpio y con temperatura controlada. Para esta aplicación, es necesario calcular de qué manera la frecuencia de trabajo nominal del horno induce calor dentro del crisol lo cual depende de factores como los mencionados al principio de este trabajo, por ejemplo para el calentamiento superficial de acero inoxidable se puede llegar hasta 1MHz dependiendo de la profundidad deseada del calentamiento si se ocupan frecuencias de 10 Khz a 50 Khz el calentamiento será más profundo y uniforme. En otros materiales como el grafito por ejemplo, usado en la elaboración de crisoles, a 345 KHz la profundidad de penetración es de 2.7 mm se prevé que esta temperatura sea suficiente por que el espesor de la pared de los crisoles de grafito (que se usarán en el crecimiento de cristales) es de 2 a 3 mm, no habiendo necesidad de cambiar la frecuencia de trabajo.

Por la potencia en radiofrecuencia que maneja el aparato podría (teniendo una antena) su señal fácilmente atravesar el Océano Atlántico e interferir con las estaciones radiodifusoras, cuando se trabaja con hornos de este tipo, existe oficialmente una banda destinada para este fin tanto industrial como científico y médico, cuyas frecuencias son:

- 13, 560 KHz  $\pm 0.05\%$
- 27,120KHz  $\pm 0.6\%$
- 40.68 MHz  $\pm 0.05\%$
- 915 MHz  $\pm 1.0\%$
- 400 Khz están destinados para sistema de navegación.

Las anteriores frecuencias son frecuencias diferentes a las que se utilizarán en el trabajo de nuestro horno de crecimiento de cristales, de tal manera será necesario evaluar si el horno que es motivo de esta tesis va a necesitar algunas adaptaciones o modificar el recinto donde se colocará, por esta razón, tal vez, tendremos que instalar un sistema de aislamiento de radiofrecuencia para evitar las posibles interferencias con otros equipos del instituto.

Potencia necesaria: el horno adquirido puede entregar distintas potencias reguladas por el sistema de control de potencia y dependiendo también del material y del tamaño de la carga. Para calcular la potencia en la carga para una temperatura "T" dada, hacemos uso de la ecuación 1.5 siguiente:

$$P = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Watts} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Obtenida a partir de la ley de Stefan-Boltzmann.

Donde:

A= área de radiación del cuerpo, en cm<sup>2</sup>.

e= emisividad del material

σ= constante de Stefan- Boltzmann  $5.6 \times 10^{-6}$  ergs/seg·cm<sup>2</sup>·T<sup>4</sup>.

T= temperatura en K

Gracias a esta ecuación obtenemos la potencia disipada por radiación por un cuerpo de área A, a una determinada temperatura "T" mucho mayor que la temperatura ambiente. Esta es la potencia que debe entregar el oscilador a la carga.

Intensidad de campo electromagnético. Una vez obtenida la potencia necesaria nuestro siguiente paso es calcular la intensidad del campo magnético que debemos tener disponible para poder inducir dicha potencia en la carga. Simpson dedujo que la potencia cedida por un campo magnético uniforme de frecuencia "f" a un cilindro hueco es la que se muestra en la ecuación 1.6.

$$P_{cc} = 2.5 f \cdot H_0^2 \cdot \mu \cdot Q \times 10^{-8} \text{ watts/cm}^3 \quad \text{Ecuación 1.6.}$$

Donde:

$P_{cc}$  = Potencia cedida a la carga

$f$  = frecuencia de la onda electromagnética

$H_0$  = Intensidad de campo magnético en Oersteds

$\mu$ =permeabilidad del material en gauss/oersted

$Q$ = Factor de calidad que depende de la conformación del cilindro y del material utilizado, en particular de las relaciones:  $\frac{d}{\delta}$  y  $\frac{t}{d}$  donde  $d$ = diámetro exterior del cilindro,  $\delta$  = profundidad de penetración de la onda electromagnética a la frecuencia de trabajo en el material usado como carga y  $t$ = espesor de la pared del cilindro.

Consideraciones básicas de seguridad. El sistema que forma el horno, como ya mencioné anteriormente, maneja mucha potencia internamente (52 KW), con altas tensiones (el oscilador se alimenta con 7,500 V de corriente continua), y a la salida del transformador elevador se tiene 1,866.7 V de voltaje pico de corriente alterna, es decir, 1,320 V RMS. Los fabricantes advierten que tanta potencia puede generar cargas electrostáticas y descargas inductivas en la periferia del equipo durante la operación. Además contiene varios capacitores que almacenan bastante energía y aun apagado el equipo pueden ser muy peligrosos para los operadores, asimismo guarda grandes campos magnéticos alrededor (tridimensionalmente hablando) del bulbo del oscilador, aun apagado, capaces incluso de arruinar un reloj de pulso impulsado por motor electromagnético. Es imprescindible entonces no olvidar todas las observaciones de seguridad que recomienda el fabricante.

## CAPÍTULO II

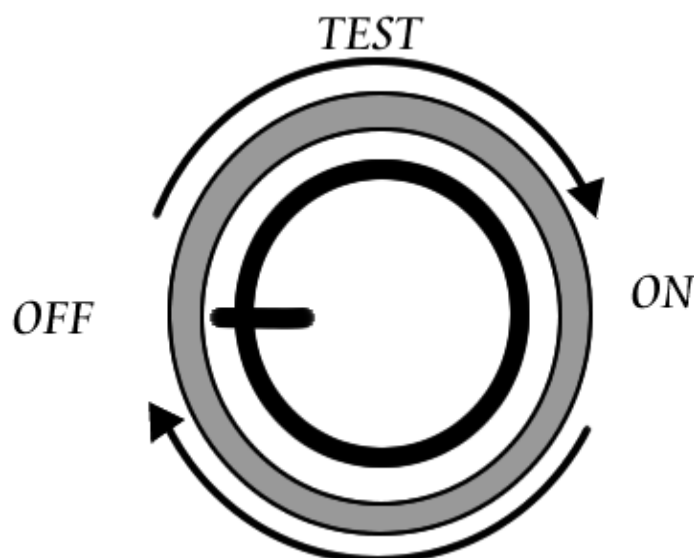
### TEORÍA ELECTRÓNICA DEL HORNO

---

El sistema que forma el horno, como ya mencioné anteriormente, cuenta con diversos módulos electrónicos y en el presente capítulo los analizaré a detalle.

#### 2.1 Circuito de la fuente de poder

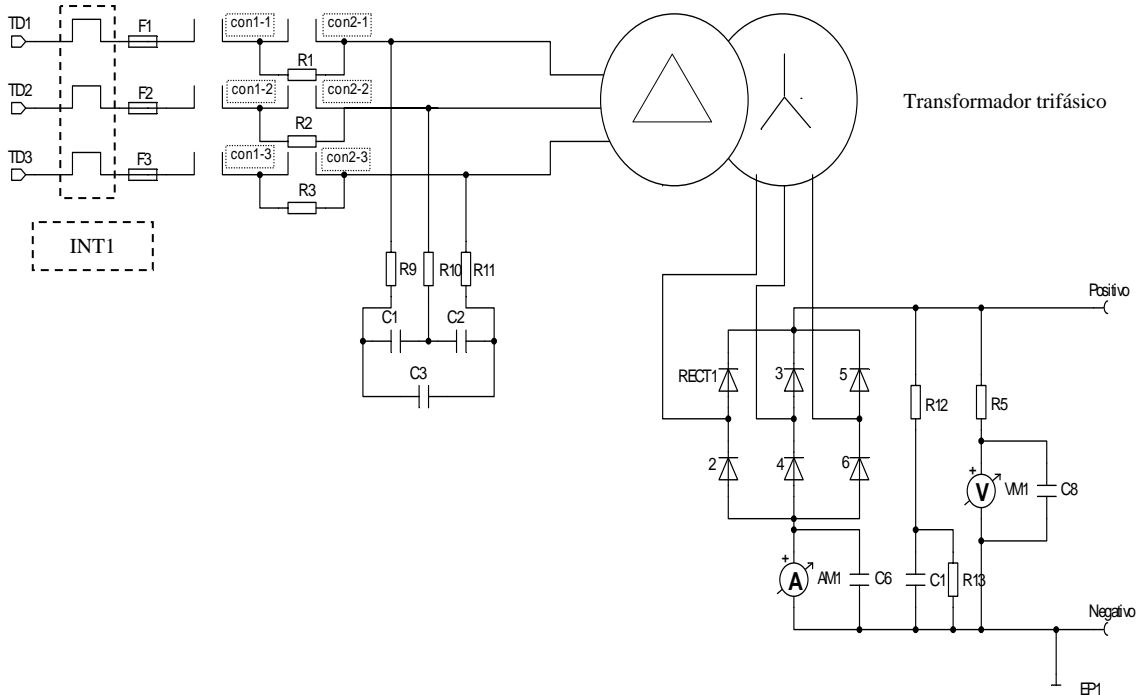
Como expliqué *a grosso modo* en el capítulo anterior esta parte del circuito se encargará de alimentar de potencia a todos los módulos antes mencionados. El diagrama es el que se muestra en la figura 2.2



**Figura 2.1. Interruptor general el cual necesita una llave especial.**



El circuito comienza con un interruptor selector, (figura 2.1) accionado con una llave especial que, como medida de seguridad, es la misma que abre el gabinete donde se aloja el oscilador, para de esa manera evitar que se encienda el horno con el gabinete abierto y haya fugas de radiofrecuencia que son peligrosas. El interruptor anterior puesto en la posición de **TEST (prueba)** accionará el primer interruptor trifásico **INT1**, este último es seguido de tres fusibles magnéticos (F1, F2, F3), uno para cada fase, que abrirán el circuito en caso de sobrecarga, este último interruptor el **INT1** a su vez enciende otro interruptor controlado magnéticamente el **con1** (contactor 1). En seguida hay otra terna de contactos magnéticamente controlados, cada uno con una resistencia en paralelo, esta última resistencia eléctrica está presente para evitar el arco eléctrico producido por la ruptura de la rigidez dieléctrica del aire del interruptor cuando se cierran los contactos. Estos últimos cierran el circuito un momento después de que se pone el interruptor general en la posición de **ON (encendido)**, ver figura 2.1.

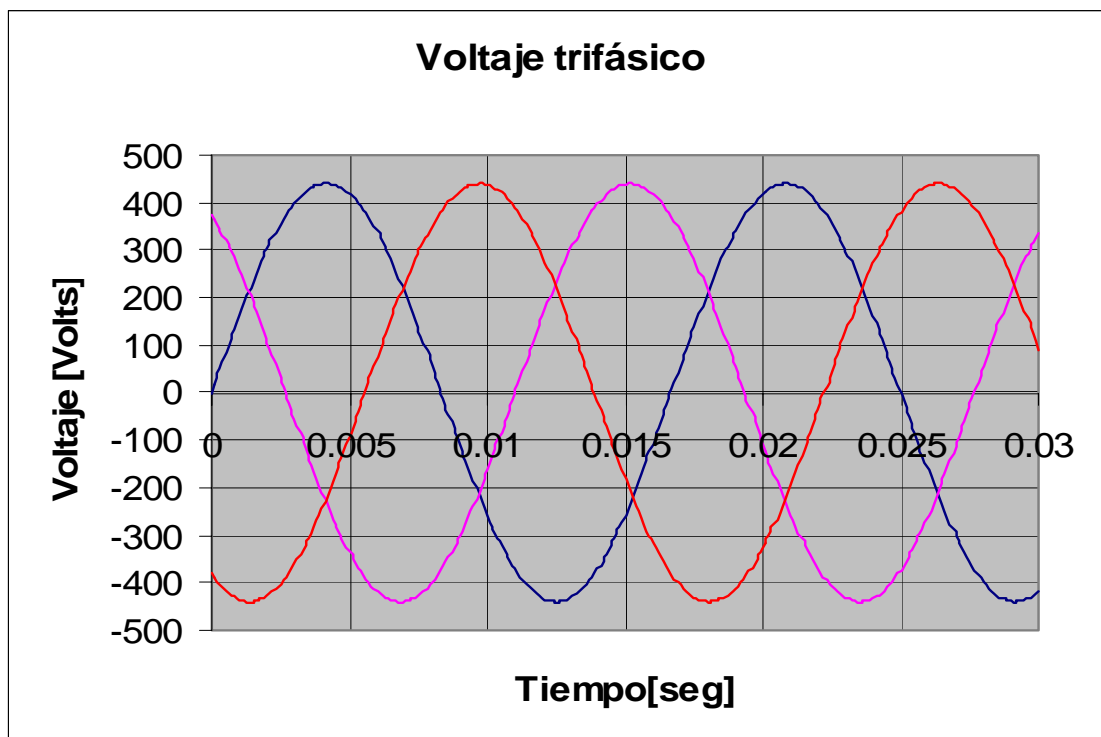


**Figura 2.2. Fuente de poder del horno de inducción**

A continuación se tiene la etapa electrónica del circuito de alimentación con resistencias y capacitores que tienen la misión de tener el factor de potencia

cercano a la unidad, después se introduce al primario de un transformador trifásico con conexión delta en el primario y “estrella” en el secundario, el propósito de este transformador es elevar el voltaje de entrada para que en el secundario se tenga el voltaje necesario para activar el horno y todos sus circuitos secundarios.

En la siguiente etapa hay un puente de Graetz trifásico que permite el paso en un sólo sentido del flujo eléctrico, realizando la rectificación en onda completa. En este caso al manejarse corriente trifásica, el puente de Graetz tiene el efecto de sumar en la salida los voltajes y obtener una sola señal que se muestra en la figura 2.5.

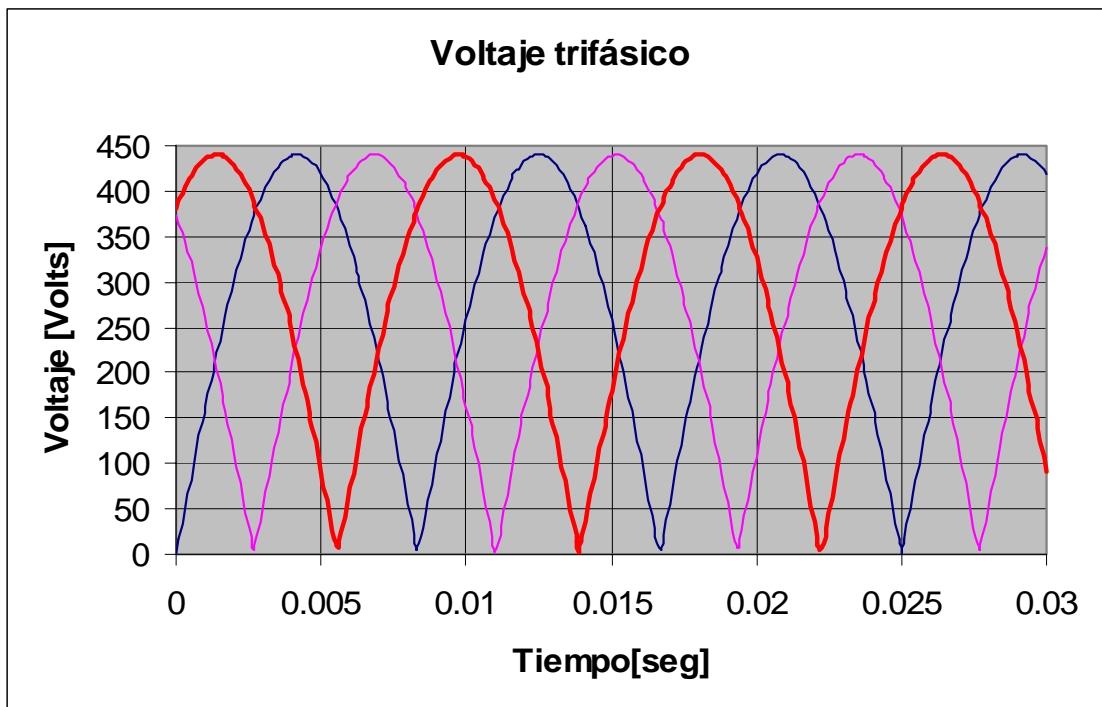


**Figura 2.3. Voltaje trifásico de alimentación del horno.**

Este puente está formado por REC1, REC2, REC3, REC4, REC5 y REC6, los cuales no son sólo un diodo, es un grupo de diodos, cada grupo es conectado en serie para poder resistir el voltaje inverso e impedir el regreso de la corriente a través de ellos, al estar en serie provocan una caída de voltaje propia de los

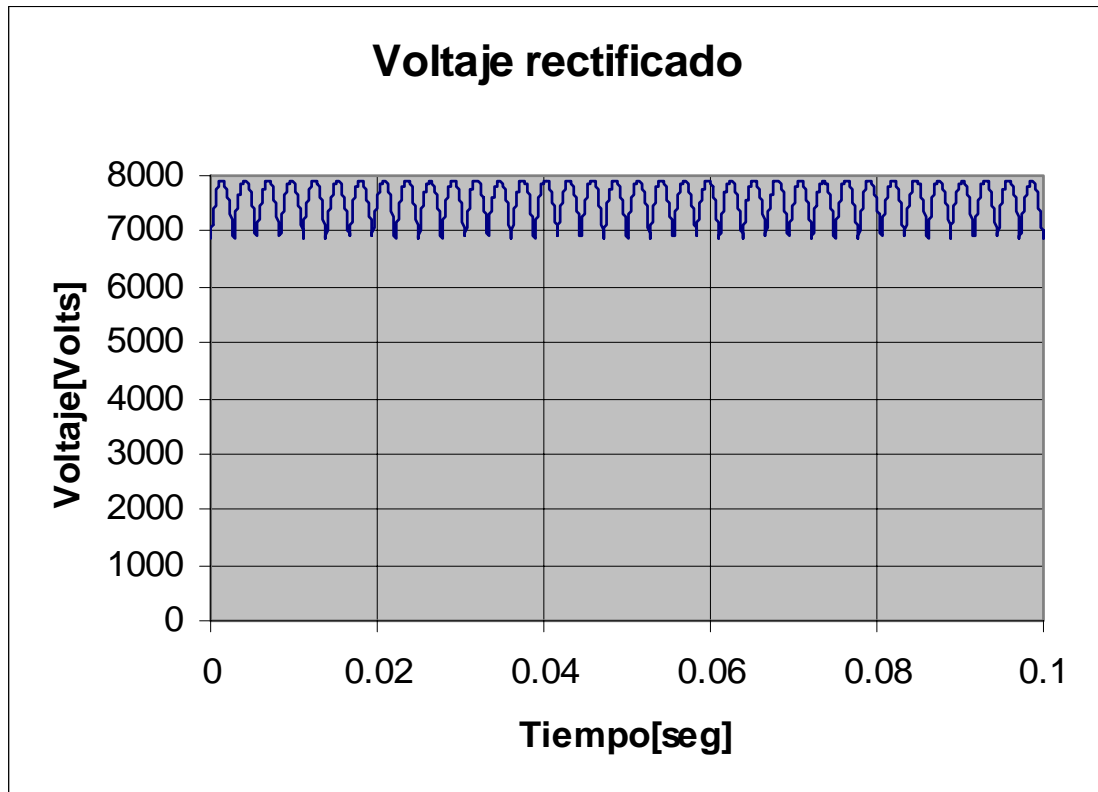
diodos rectificadores, la cual es irrelevante por ser pequeña (unos cuantos volts) en comparación con el voltaje de salida de 7,500 volts de corriente continua. Dicho puente se encarga de impedir que la corriente alterne (vaya y venga) y permite generar una señal de salida en corriente directa.

Esta señal varía un poco, tiene un rizado en la parte superior, formada por diversas frecuencias: por lo que no es estrictamente corriente continua. Para atenuar estos rizados se coloca un filtro de RC formado por las resistencias R12, R13, R5 y el capacitor de alto voltaje C1 (ver figura 2.1). Con esto se garantiza la alimentación de corriente continua de los circuitos del aparato.



**Figura 2.4. Gráfica que muestra la magnitud de cada una de las fases rectificadas en onda completa**

La corriente continua se transmite por dos conductores, el conductor positivo y el conductor negativo. El negativo en este caso se va a conectar al gabinete del aparato, a través del tornillo EP1 (como se ve en la figura 2.1), para lograr que todo el gabinete esté referido a ese potencial.



**Figura 2.5** Forma en que sale la onda después de pasar por el puente de Graetz trifásico se pueden ver los pequeños rizados en la parte superior

La parte positiva de la fuente se le llama conductor HT y sirve para alimentar al oscilador. Una derivación de este conductor se va al módulo de control de potencia (30-2126-C) para servir como referencia. En este circuito está conectado uno de los amperímetros del panel, el que dice la corriente de ánodo y el voltímetro de voltaje de ánodo que está en el panel de control del usuario.

## 2.2 Circuito oscilador

A continuación describiré el módulo principal del aparato; que es, el circuito oscilador este circuito tiene como elemento principal de amplificación un tríodo de alta potencia de porcelana, el cual puede manejar corrientes de 7.5 amperes y 7,500 Voltios y necesita refrigeración por agua para esto, el aparato cuenta con un circuito hidráulico apropiado, que en este caso permitirá la circulación de 3.5 UK galones/minuto; que son aproximadamente 19.911 litros/minuto.

Primero voy a dar una pequeña reseña acerca de lo que es un bulbo tríodo.

Un bulbo tríodo básicamente es una ampolla de vidrio o en este caso porcelana, a la cual se le ha extraído en lo posible el gas ambiental para conseguir una cavidad donde haya el menor número de moléculas activas que reaccionen con el filamento. La operación del tríodo se basa en el llamado Efecto Edison, que consiste en que cuando un filamento se calienta a cierta temperatura emite electrones, que pueden ser atraídos hacia una placa con polaridad positiva, con este principio básico es con el que se forma lo que se llama bulbo rectificador de corriente.

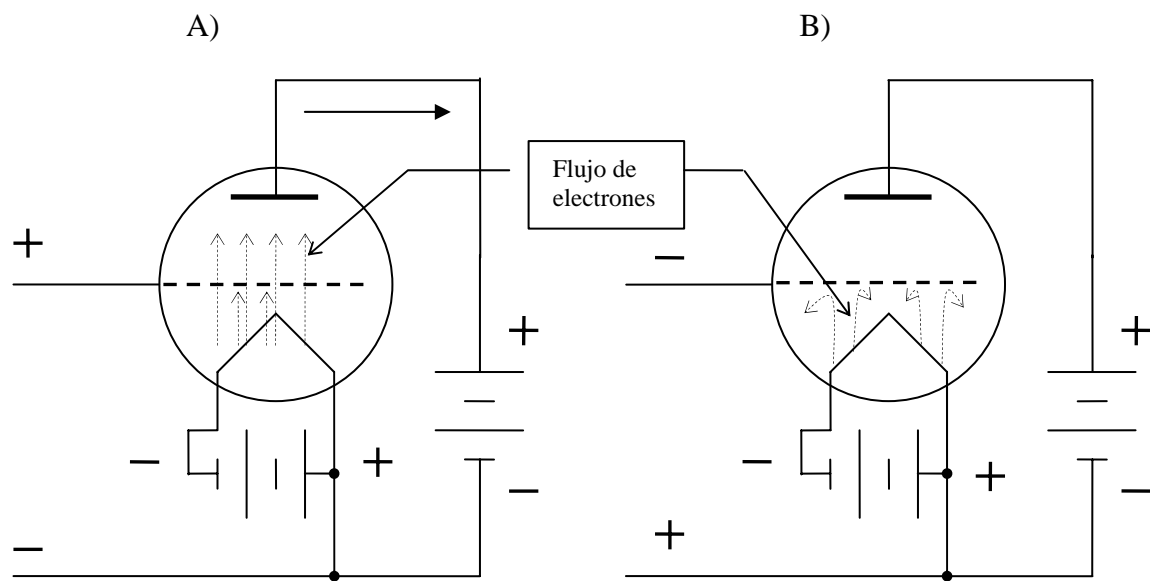
Lee De Forest introdujo un tercer electrodo en el bulbo, entre filamento (cátodo en el caso del bulbo del horno) y placa, más cerca del filamento que de la placa, la denominada rejilla, así se creó un nuevo dispositivo. La rejilla será el tercer electrodo, formando el bulbo tríodo.

Esta rejilla tiene una gran influencia en el flujo de electrones que se dirige a la placa, actuando de la siguiente forma: cuando se le aplica un pequeño potencial positivo de cátodo a rejilla esta última atrae electrones hacia ella, pero al ser más positiva la placa o ánodo los electrones al pasar por la rejilla recibirán un tirón extra hacia la placa del filamento. En cambio si el potencial al que se pone la rejilla es negativo alejará algunos de los electrones emitidos desde el filamento y sólo un pequeño número de ellos pasaran a través de los espacios de la rejilla hacia la placa positiva, disminuyendo la corriente que fluye a través del circuito de placa, si se agranda la carga negativa entonces disminuirá el flujo hasta que no pase ningún electrón, como se ve en la figura 2.6. De esta manera es como se logra controlar el flujo de electrones con ayuda de un bulbo tríodo.

Todo esto nos hace verificar que los bulbos son dispositivos de amplificación controlados por voltaje y no por pequeñas corrientes como en el caso del transistor bipolar que es el que más conocemos.

La explicación de cómo se obtiene la amplificación en un bulbo tríodo se tiene teniendo en cuenta que una variación muy pequeña en la tensión de rejilla da lugar a una gran variación de corriente de placa.

Existen varias configuraciones básicas en las que se pueden conectar como amplificadores los tríodos, en el caso de este oscilador la conexión se clasifica como clase A.



**Figura 2.6. Diagrama donde se muestra la circulación de corriente por un bulbo tríodo dependiendo del potencial que exista de rejilla a cátodo.**

El amplificador clase A se caracteriza, entre otras cosas, porque puede amplificar los 360° de la señal senoidal, porque opera en onda completa y en un oscilador como el que necesitamos es necesario.

En estos amplificadores es muy importante la polarización, porque nos va a permitir saber mediante la hoja de especificaciones la Q en la que se puede trabajar, conociendo la intersección del valor del  $V_g$  (voltaje de rejilla o  $I_B$  en el caso de los transistores bipolares) con la recta de carga en DC se determina el punto de operación. Sabiendo este dato se puede saber el recorrido que puede tener en cuanto a voltaje y corriente como se ve en la figura 2.7. Las curvas características correspondientes a este bulbo se muestran en la figura 2.10.

Cuando se aplica una señal de entrada al amplificador la salida variará en su voltaje y corriente de operación de DC. Una pequeña señal de entrada (proporcionalmente hablando), causará que el voltaje de rejilla varíe por arriba y por debajo de la polarización, que a su vez causará que la corriente de ánodo o placa se modifique desde el punto de polarización, de acuerdo a como varía el voltaje de ánodo alrededor de su valor de polarización, que se muestra en la figura 2.7. Conforme la señal de entrada se hace más grande, la salida variará más allá del punto Q hasta que se llegue al límite.

En el caso de la corriente este valor estará dado por cero en el valor inferior y en el superior la corriente será  $V_a/R_a$ . Para el caso del bulbo del horno estos valores serán  $V_a/R_a = 7,500V/1000\Omega = 7.5A$  en el caso del voltaje el intervalo será desde cero hasta el valor del voltaje de alimentación, en este caso 7,500V.

Circuito amplificador básico. El circuito amplificador de bulbo trío clase A más conocido y que usa el horno de esta tesis es el representado en la figura 2.8. En esta disposición la señal de entrada se aplica entre rejilla y tierra, y la señal de salida aparece entre placa y tierra. El circuito equivalente de AC de este amplificador se ve en la figura 2.9, el cual es un modelo  $\pi$  que es el que corresponde a dispositivos amplificadores controlados por voltaje. Como consecuencia de la disposición del circuito, este amplificador se le conoce generalmente como “circuito de cátodo a tierra” o “circuito de cátodo común” ya que las corrientes de placa y de rejilla (cuando las hay) circulan a través del circuito del cátodo.

Definición de un oscilador. Un oscilador es un circuito que cumple los criterios de Barkhausen y, por consiguiente, produce una forma de onda de voltaje repetitiva en su salida con sólo el voltaje de alimentación de CD como entrada, por esto, no se requiere señal de entrada repetitiva. El voltaje de salida puede ser sinusoidal o no sinusoidal, dependiendo del tipo de oscilador.

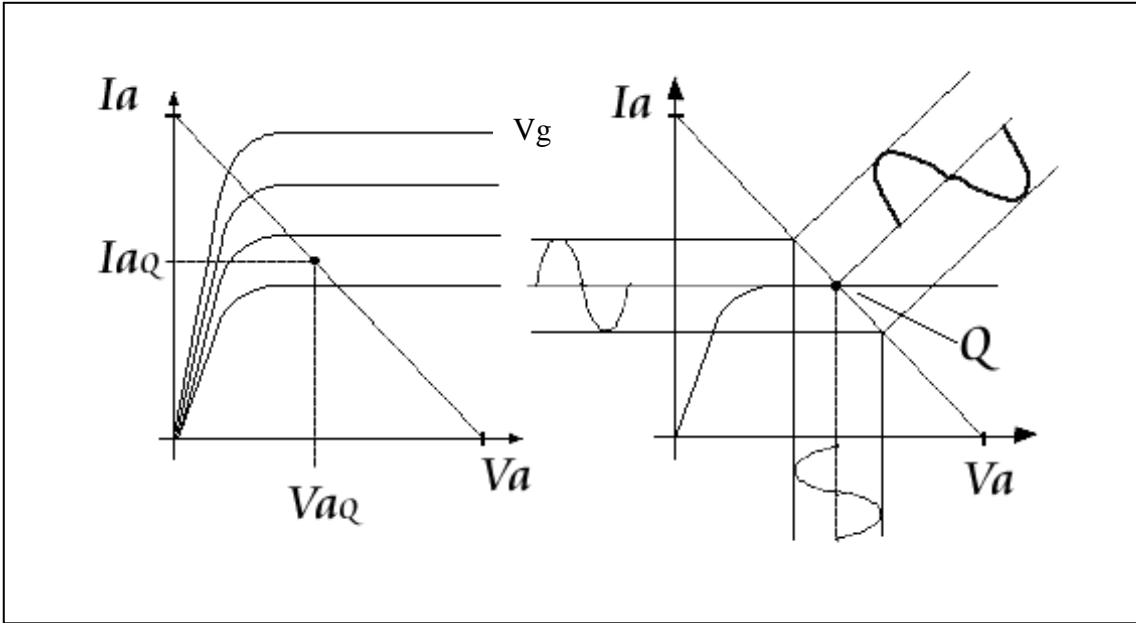


Figura 2.7. En estas gráficas se puede ver como varía la corriente alterna alrededor del punto Q en base a la polarización del bulbo.

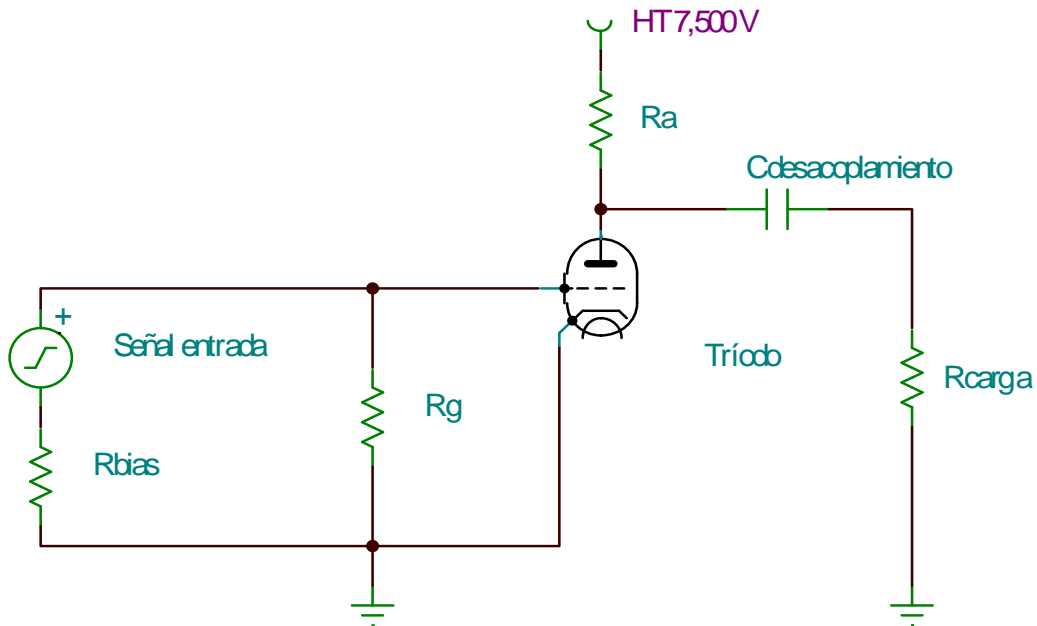
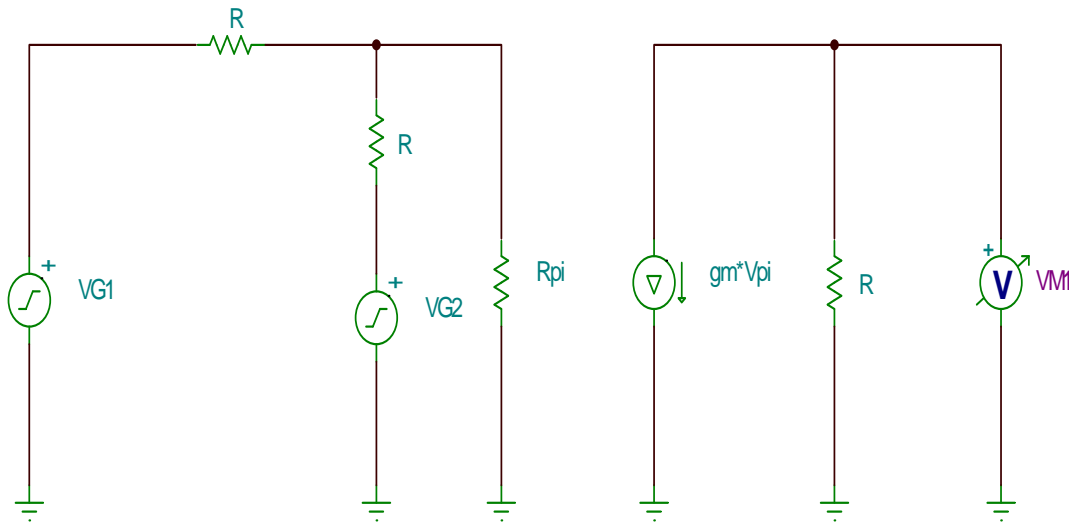


Figura 2.8. Diagrama del amplificador básico del oscilador

Para comprender como se comporta un circuito realimentado como oscilador, considere el circuito realimentado de la figura 2.11. Cuando se polariza y se le aplica una señal en la entrada el voltaje de salida  $V_o = A \cdot V_i$ , después de pasar



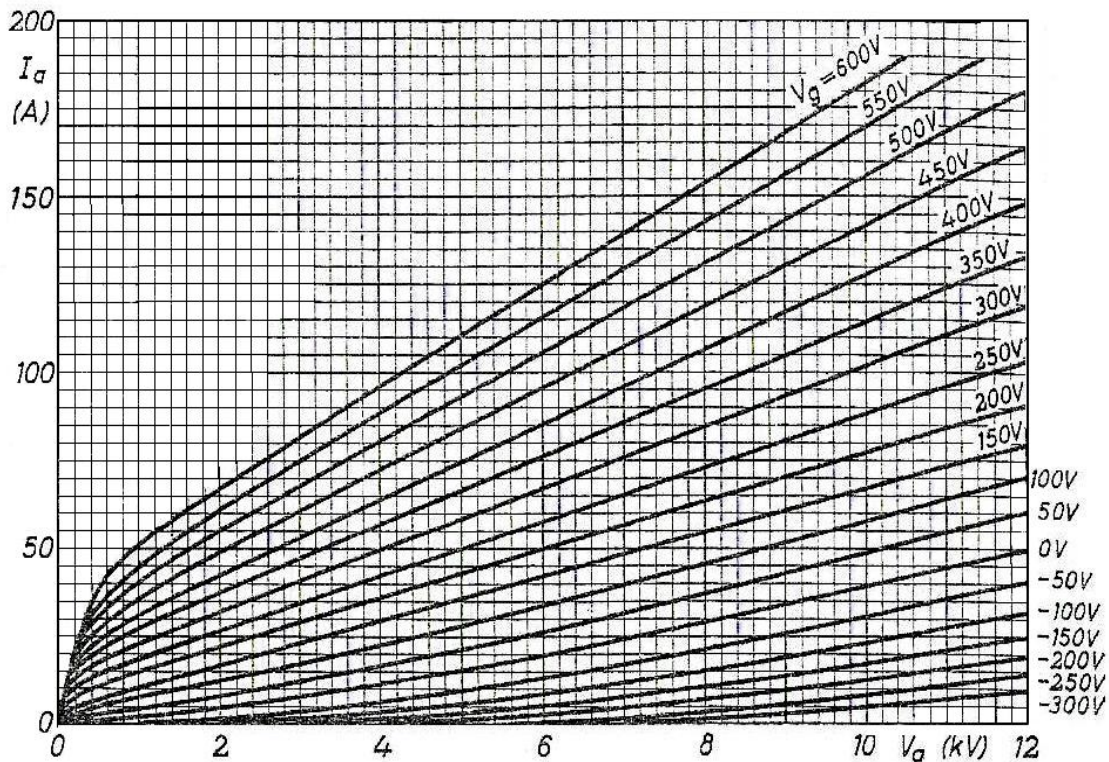
por la etapa de amplificación y un voltaje  $V_f = \beta(A \cdot V_i)$  después de la etapa de retroalimentación. Por lo tanto tenemos una ganancia de retroalimentación llamada ganancia de lazo. Lo que se busca en un oscilador es igualar  $V_f$  con  $V_i$  que significa que  $\beta \cdot A = 1$  o sea la amplificación será de 0 dB lo que se llama criterio de Barkhausen para la oscilación.



**Figura 2.9 –Circuito equivalente del amplificador en corriente alterna**

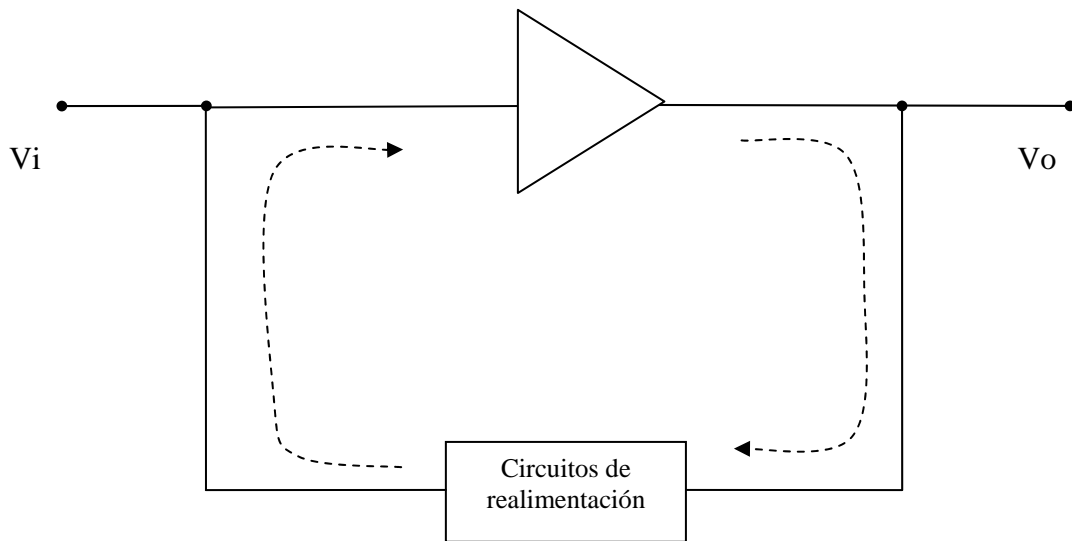
Condiciones de arranque de un oscilador. En los osciladores no se necesita señal de entrada para arrancar la oscilación, sólo se necesita que se cumplan los criterios de Barkhausen para que resulte una oscilación autosostenida, la señal inicial proviene del ruido siempre presente en los circuitos. Para que inicie la oscilación, la ganancia de voltaje alrededor del lazo debe ser mayor que 0 dB, ver figura 2.11, de modo que la amplitud de salida pueda alcanzar el nivel deseado. Esta ganancia debe decrecer enseguida hasta ser igual a la unidad, es decir que la relación entre la salida y la entrada corresponda a 0 Decibeles eléctricos, a fin de que la salida del oscilador tenga la amplitud que necesitamos y no crezca indefinidamente lo cual haría llegar al bulbo a corte y saturación entregando una señal cuadrada con gran cantidad de armónicos de alto voltaje y corriente que someterían a los componentes a un gran esfuerzo que los dañarían.

Circuito oscilador con tríodo. Entre los osciladores que se ocupan esta el llamado oscilador Armstrong sintonizado en reja y placa en este oscilador la frecuencia de resonancia tiene relación con los circuitos de reja y de placa. Este es el oscilador que se ocupa en el horno, dada sus características de baja resistencia a la oscilación lo que nos ayudará en la eficiencia del oscilador utilizado. La retroalimentación positiva se da mediante el acoplamiento magnético de las bobina L2a y L2b, también llamadas bobinas de placa o bobinas thickler (Thickler coil), estando la primera en el circuito de placa y la segunda bobina en el circuito de reja. El oscilador se ve en la figura 2.12.

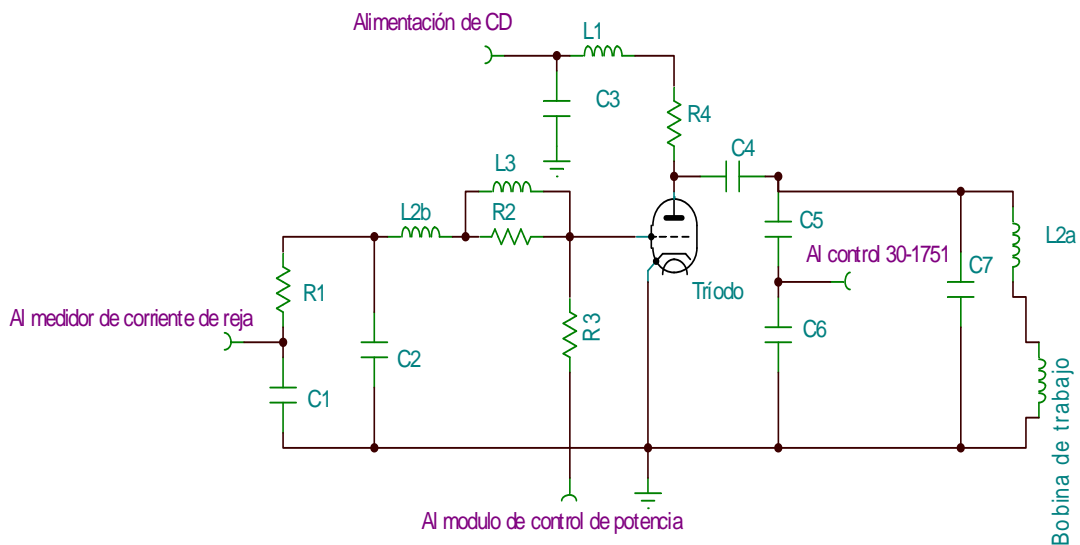


**Figura 2.10. Curvas características del bulbo del horno en el eje "x" están los voltajes de ánodo y en el eje "y" se puede ver el valor de la corriente de ánodo. Las curvas están basadas en el voltaje de reja.**

Sabiendo como funciona el amplificador analizaré ahora el circuito del oscilador



**Figura 2.11, diagrama de bloques de un amplificador que cuenta con circuitos de retroalimentación**



**Figura 2.12 Diagrama eléctrico del oscilador del horno**

### 2.2.1. Análisis de Kirchoff del oscilador

El modo de analizar los circuitos es de la siguiente manera. Al ser un circuito con retroalimentación positiva dada por dos bobinas acopladas, se le llama oscilador regenerativo. Diseñado por el ingeniero Edwin Armstrong para crear la portadora que se necesita para telecomunicaciones. Este oscilador se ve en

la figura 2.13, está formado por dos circuitos: el de reja a cátodo y el de ánodo a cátodo este último a tierra. Aunque el cátodo esté a tierra el sistema deberá tener una oscilación positiva y negativa, gracias a los dispositivos C1, R1 y C2, las cuales forman una impedancia que permite al sistema que por estos fluya la corriente negativa, al estar referenciado el negativo de la retroalimentación a ellos y no a tierra. Estos circuitos (el de reja y placa) se encuentran acoplados por las bobinas L2 y por la relación que existe entre el voltaje de reja a cátodo y la corriente de ánodo, de tal forma se tiene para el circuito del horno la figura 2.13. En base a este circuito como se hará el análisis de Kirchoff siendo el generador de voltaje E simplemente un auxiliar para resolver el circuito, teniendo en cuenta que el voltaje de dos bobinas acopladas magnéticamente está dado por la ecuación  $V_{L2b} = L2b \cdot \frac{dI_g}{dt} + M \frac{dI_a}{dt}$  y en el otro circuito por

$$V_{L2a} = L2a \cdot \frac{dI_a}{dt} + M \frac{dI_g}{dt}$$

Donde:

$V_{L2}$  = Voltaje de la bobina acoplada

L2a=la inductancia de la bobina L2a de placa desacoplada

L2b = la inductancia de la bobina L2b de reja desacoplada

Ig = Corriente del circuito de reja

Ia = corriente del circuito de ánodo

M = Valor de la inductancia mutua

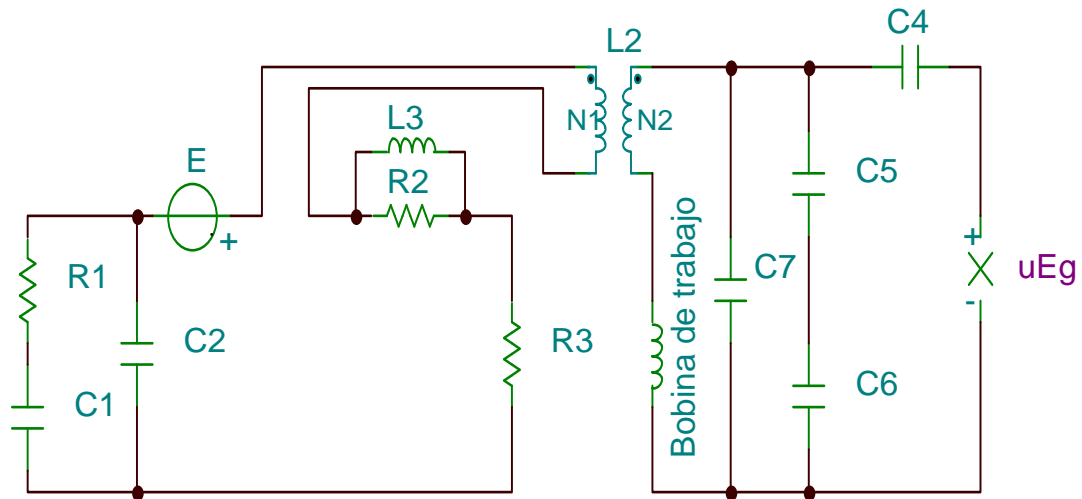
El valor de Eg es el voltaje de reja que estará dado por la ecuación  $E_g = R3 \cdot I_g$

El valor de  $u \cdot E_g$  ó  $\mu \cdot E_g$  es la ganancia de voltaje en el circuito de reja.

Quedan entonces las dos ecuaciones por Kirchoff de la siguiente manera:

$$E = j \cdot \omega \cdot L2b \cdot I_g - j \cdot \omega \cdot |M| \cdot I_a + \frac{R2 \cdot j \cdot \omega \cdot L3}{R2 + j \cdot \omega \cdot L3} \cdot I_g + \left[ \left( R1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \parallel \frac{1}{j\omega C_2} \right] \cdot I_g$$

$$E = j \cdot \omega \cdot L2b \cdot I_g - j\omega|M| \cdot I_a + \frac{R2 \cdot j \cdot \omega \cdot L3}{R2 + j\omega L3} \cdot I_g + \frac{\left( R1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{\left( R1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot I_g$$



**Figura 2.13. En este circuito se ven las relaciones entre los circuitos a los que está conectado el bulbo tríodo del horno. A la izquierda el circuito de rejá y a la derecha el circuito de ánodo.**

Y para el circuito de ánodo utilizaré para simplificar, las reactancias de los componentes siendo  $X_M$  la reactancia mutua y  $X_{Lw}$  la reactancia de la bobina de trabajo, también eliminaré el valor de la reactancia de  $L1$  que al ser la bobina de Choke tiene una inductancia muy grande y en el análisis de CA se considera un circuito abierto.

$$\mu E_g = \left[ X_{C4} \cdot I_a + (X_{C5} \parallel X_{C6}) \right] (X_{C7} \parallel (X_{L2a} + X_{Lw})) \cdot I_a - X_M \cdot I_g$$

Sustituyendo las reactancias por su valor en frecuencia la ecuación queda como sigue:

$$\mu E_g = \left[ \frac{1}{j\omega C_4} I_a + \left( \frac{\frac{-1}{\omega^2 C_5 \cdot C_6}}{\frac{1}{j\omega C_5} + \frac{1}{j\omega C_6}} \right) \parallel \frac{1}{j\omega C_7} \parallel j\omega L_{2a} \cdot I_a + j\omega L_w \cdot I_a - j\omega M \cdot I_g \right]$$

$$\mu E_g = \left[ \frac{1}{j\omega C_4} I_a + \left( \frac{\frac{-1}{\omega^2 C_5 C_6}}{\frac{1}{j\omega C_5} + \frac{1}{j\omega C_6}} \right) \parallel \frac{j\omega L_{2a} + j\omega L_w}{j\omega C_7} \right] \cdot I_a - j\omega M \cdot I_g$$

$$\mu E_g = \left[ \frac{1}{j\omega C_4} I_a + \left( \frac{\frac{-j\omega L_{2a} - j\omega L_w}{j\omega^3 C_5 C_6 C_7}}{\frac{1}{j\omega C_5} + \frac{1}{j\omega C_6} + \frac{1}{j\omega C_7} + j\omega L_{2a} + j\omega L_w} \right) \right] I_a - j\omega M \cdot I_g$$

Estas dos ecuaciones derivan en un resultado de la forma de la ecuación 2.1

$$I_a = \frac{E}{R_{eq} + jX_{eq}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$R_{eq}$  = Es la resistencia equivalente del circuito

$X_{eq}$  = Es la reactancia equivalente que es igual como en la ecuación 2.2

$$X_{eq} = \omega L_{eq} - \frac{1}{\omega C_{eq}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

El circuito será resonante en la frecuencia en la que el valor  $X_{eq}$  sea igual a cero y es en esta frecuencia en la que oscilará el circuito, como se ve en la ecuación 2.3. Según las pruebas realizadas sí coincide la oscilación con señalada por el fabricante que es 365 KHz.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 365 \text{ KHz} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

## Especificaciones del bulbo principal

El bulbo principal cuenta con las características eléctricas mostradas en la tabla 2.1 dadas en el instructivo de funcionamiento del aparato, sin embargo no incluyeron las tablas de este bulbo ni alguna gráfica que muestre su comportamiento con respecto a la frecuencia.

Parámetros de D.C.	Corriente máxima de ánodo ( <i>anode current</i> )	7.5 A
	Voltaje de ánodo ( <i>anode voltage</i> )	7.5KV
	Corriente de reja ( <i>grid current</i> )	75-120 mA
	Potencia ( <i>Power</i> )	52.5 KW
Filamento del bulbo	Voltaje	9.5 V $\pm$ 5%
	Corriente	21 A

**Tabla 2.1 Características de CD del bulbo principal del oscilador**

### 2.2.2. Características de funcionamiento de los osciladores en hornos de radiofrecuencia

Cuando un oscilador suministra potencia a una carga, se debe asegurar la retroalimentación correcta, si la retroalimentación no es suficientemente grande, es decir, si la excitación de reja es demasiado pequeña, un ligero cambio en la carga, en este caso el crisol y su contenido, tenderá a sacarlo de oscilación. Por otra parte, un exceso de realimentación hará excesiva la intensidad del voltaje de reja, con el resultado de que llevará el bulbo a saturación lo que significa número grande de armónicas que pueden dañar el sistema. Como el oscilador mismo suministra esta energía de reja, una realimentación excesiva disminuye el rendimiento de conjunto puesto que

aquella potencia que se utilice en el circuito de reja, no queda disponible como salida útil. El horno cuenta con un tornillo externo que permite variar la retroalimentación mediante la variación del acoplamiento de la bobina L2a y L2b, el ajuste del horno debe hacerse antes de poner la carga para verificar que este presente la oscilación, y después de puesta la carga también para asegurarse de que el sistema siga oscilando de manera correcta con la carga presente.

En el funcionamiento de un oscilador una consideración importante es la estabilidad de frecuencia. Los factores principales que pueden provocar un cambio en la frecuencia son:

- 1) las variaciones de temperatura;
- 2) las variaciones de tensión de placa;
- 3) las variaciones de carga;
- 4) y las variaciones mecánicas de los elementos del circuito como en las bobinas con núcleo de aire que están descubiertas.

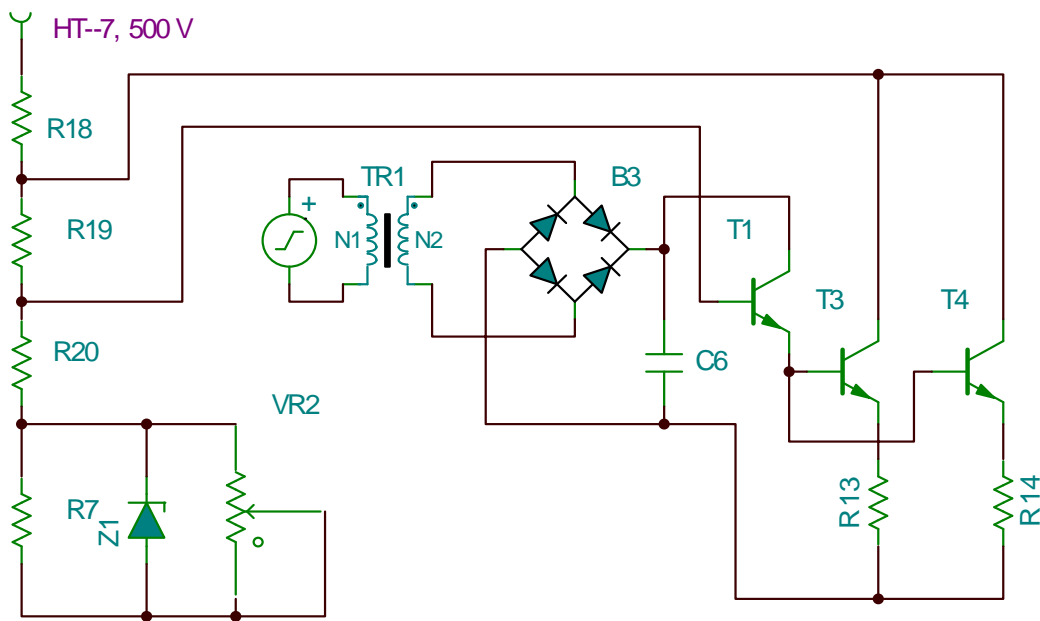
Los cambios de temperatura harán que los elementos constitutivos de los bulbos se dilaten o contraigan ligeramente, causando así variaciones en las capacidades interelectrónicas. Estas variaciones por fuerza cambiarán el circuito en su totalidad y resultarán en un cambio en la frecuencia. Los cambios de temperatura en las bobinas alteran ligeramente su autoinducción o su capacidad, causando un desplazamiento de la frecuencia de resonancia, estos efectos son relativamente lentos en su proceso. Al cambio en la frecuencia se le llama corrimiento. Para evitar estos trances provocados por la variación de temperatura y también para protección contra sobrecalentamientos esta la refrigeración hidráulica, que estabiliza la temperatura del aparato.

Una variación en la tensión de placa causará una variación pequeña de la frecuencia, efecto que se denomina inestabilidad dinámica. Existen varias

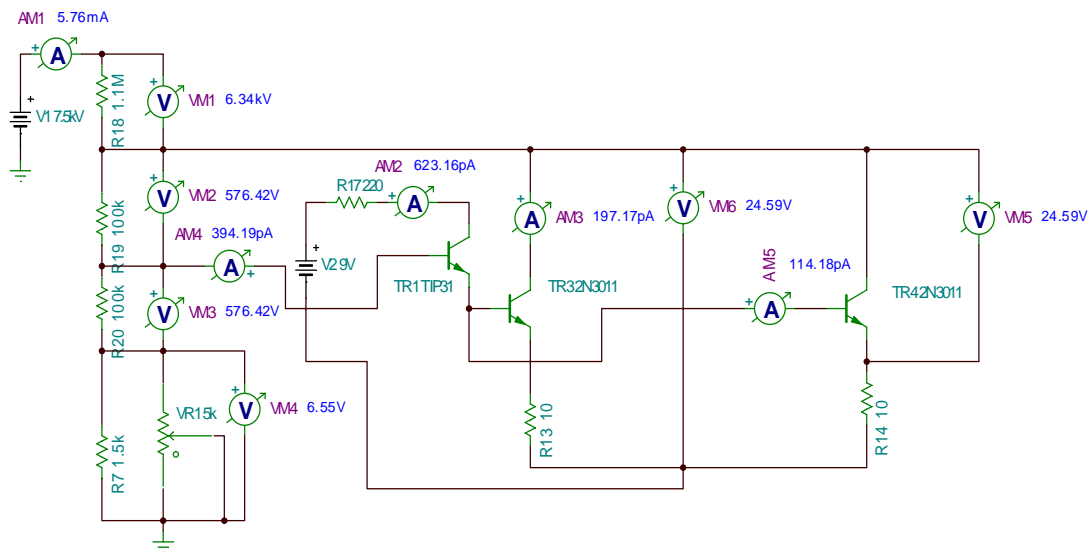


formas de paliar este problema, en el caso del horno cuenta con un sistema compensador que esta formado por el transistor T1 alimentado independientemente con el transformador TR1 junto con el puente de Graetz B3 y el capacitor C6 de 2200  $\mu$ F que compensarán las variaciones en la alimentación de corriente directa de todo el sistema. El sistema como se ve en la figura 2.14, toma corriente directa del divisor de voltaje formado por R18, R19, R20, R7 y VR2 y conectado a HT (7,500 V), esta se introduce en la base del transistor T1 a cuyo emisor esta conectado las bases de los transistores T3 y T4, o sea están conectados en cascada, de tal manera que una disminución en el voltaje HT del aparato significará una disminución en la corriente de base de T1 y una disminución en la corriente de base de T3 y T4, aumentando el voltaje colector - emisor, y cuando el voltaje se eleva aumenta en consecuencia la corriente de base de T1 aumentando la corriente de base de T3 y T4 lo que disminuirá el voltaje colector – emisor, disminuyendo el potencial al que estará referido el cátodo del bulbo diodo PY500A. Haciendo la simulación de este circuito por medio de la herramienta computacional Tina V 6.0, se obtuvieron primero los valores más importantes de voltaje y corriente colocando en cada punto un medidor para observar el comportamiento del circuito y comprobar su función, esta simulación se muestra en la figura 2.15, los valores de cada nodo se pueden ver en la tabla 2.2.

Para comprobar el funcionamiento del compensador se disminuyó el voltaje HT de 7,500 V a 7,300 V para comprobar el aumento en el voltaje base-emisor señalado por el voltímetro VM5 y VM6, además se observa la disminución de las corrientes a través de los transistores marcado por los amperímetros AM2, AM3, AM4 y AM5. Como se ve en la tabla 2.3.



**Figura 2.14, Diagrama del compensador de voltaje presente en el control de potencia 30-2126C**



**Figura 2.15, Diagrama que muestra los valores obtenidos en cada medidor mediante el análisis de CD del programa Tina V6.0**

Después se hizo el experimento de aumentar al valor extremo de 7,800 V el valor del voltaje HT para comprobar de nuevo el funcionamiento del compensador, los resultado se pueden observar en tabla 2.4, comprobándose la función de este subcircuito.

	Nodos	Valores
Amperímetros	AM1	5.76mA
	AM2	623.26pA
	AM3	197.01pA
	AM4	394.26pA
	AM5	114.49pA
Corriente en las resistencias	I_R13	311.64pA
	I_R14	311.64pA
	I_R17	623.26pA
	I_R18	5.76mA
	I_R19	5.76mA
	I_R20	5.76mA
Voltaje marcado en los voltímetros	I_R7	4.36mA
	V_VM1	6.34kV
	V_VM2	576.42V
	V_VM3	576.42V
	V_VM4	6.55V
	V_VM5	24.54V
	V_VM6	24.54V

**Tabla 2.2. Valor de las corrientes y voltaje de los nodos que tiene el circuito compensador cuando trabaja normalmente**

	Nodos	Valores
Amperímetros	AM1	5.61mA
	AM2	608.87pA
	AM3	195.2pA
	AM4	390.8pA
	AM5	108.71pA
Corriente en las resistencias	I_R13[13,14]	304.43pA
	I_R14[11,14]	304.45pA
	I_R17[15,12]	608.87pA
	I_R18[3,5]	5.61mA
	I_R19[5,4]	5.61mA
	I_R20[4,2]	5.61mA
	I_R7[2,0]	4.25mA
Voltímetros	VM1	6.17kV
	VM2	561.05V
	VM3	561.05V
	VM4	6.37V
	VM5	26.34V
	VM6	26.34V

**Tabla 2.3. Valor de las corrientes y voltaje de los nodos que tiene el circuito compensador cuando trabaja a un voltaje menor al que se recomienda.**

	Nodos	Valores
Amperímetros	AM1	5.99mA
	AM2	645.23pA
	AM3	199.36pA
	AM4	399.57pA
	AM5	122.76pA
Corriente en las resistencias	I_R13[13,14]	322.6pA
	I_R14[11,14]	322.6pA
	I_R17[15,12]	645.23pA
	I_R18[3,5]	5.99mA
	I_R19[5,4]	5.99mA
	I_R20[4,2]	5.99mA
	I_R7[2,0]	4.54mA
Voltímetros	VM1	6.59kV
	VM2	599.48V
	VM3	599.48V
	VM4	6.81V
	VM5	21.57V
	VM6	21.57V

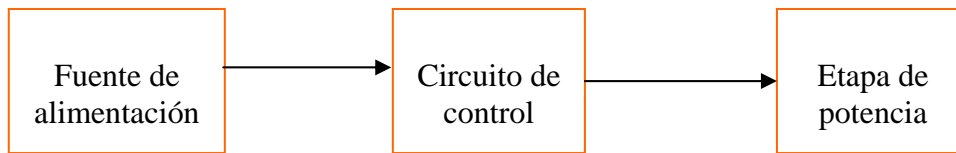
**Tabla 2.4. Valor de las corrientes y voltaje de los nodos que tiene el circuito compensador cuando trabaja a un voltaje mayor al que se recomienda.**

### 2.3 Circuito de control de potencia

Este es uno de los módulos primordiales dentro del horno, porque el principal objetivo de un horno es modificar la temperatura con respecto a la posición de la perilla del variador de potencia, esta variación se logra controlando la potencia del oscilador principal.

Este circuito de control es totalmente de funcionamiento análogo ocupando amplificadores operacionales simples, o sea un sólo amplificador operacional por cada circuito integrado, el circuito integrado mencionado es del tipo 741 y se ocupa como elemento principal para las operaciones de control. También se ocupa un conjunto de transistores de bajo y alto voltaje, junto con el diodo bulbo PY500A como elemento de control en la etapa de potencia.

Este módulo cuenta entonces con las etapas que se muestran en la figura 2.16.

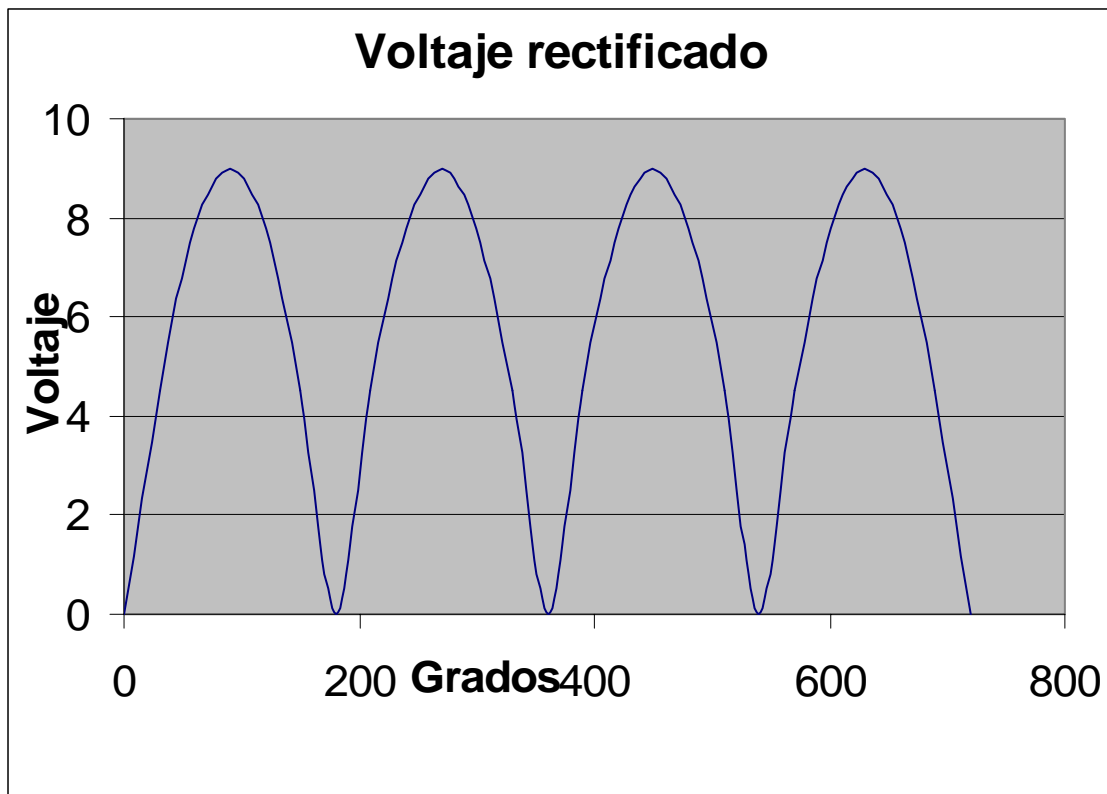


**Figura 2.16. Etapas que conforman el circuito de control.**

La fuente de alimentación consiste en un transformador reductor que se conecta a dos fases de la línea en el primario y que tiene tres bobinas en el secundario, una de estas bobinas servirán para alimentar el filamento de calefacción del diodo PY500A, los otros dos se utilizarán para la polarización positiva y negativa de los amplificadores operacionales y alimentarlos con 12 volts positivos y 12 volts negativos. A la salida de dos de los secundarios del transformador hay un puente de diodos para cada uno, para rectificar el voltaje y un capacitor de  $2200\mu\text{F}$  a la salida de cada puente para filtrar la señal de tal manera que se obtiene un voltaje en CD con un pequeño rizado como se ve en la figura 2.18. Para la parte positiva la señal se introduce a un regulador de voltaje 7812 que regulará el voltaje para que no exceda 12 V evitando cualquier sobrevoltaje y después un capacitor de  $0.47\ \mu\text{F}$  de cerámica en paralelo con uno electrolítico de  $10\ \mu\text{F}$  que atenuarán cualquier rizo restante. En el caso de la polarización negativa se conectara el negativo del primer puente al positivo del segundo y esta unión se establecerá como la referencia a tierra, la señal negativa se filtrará con capacitores iguales a los de la parte positiva y se empleará un diodo de tipo Zener como regulador de voltaje que conducirá en el caso de que el voltaje exceda los 12 V protegiendo los circuitos integrados.

Este circuito de control de potencia, como ya mencioné, tiene dos amplificadores operacionales 741 que se polarizan con la fuente antes mencionada, dichos amplificadores operacionales están cada uno formando una etapa, el análisis de cada una de estas dos etapas servirá para entender como es que se puede controlar 30 KW de potencia con un potenciómetro de baja potencia como este de 1 W. El análisis se muestra a continuación, incluyendo gráficas de las señales involucradas. El primer amplificador

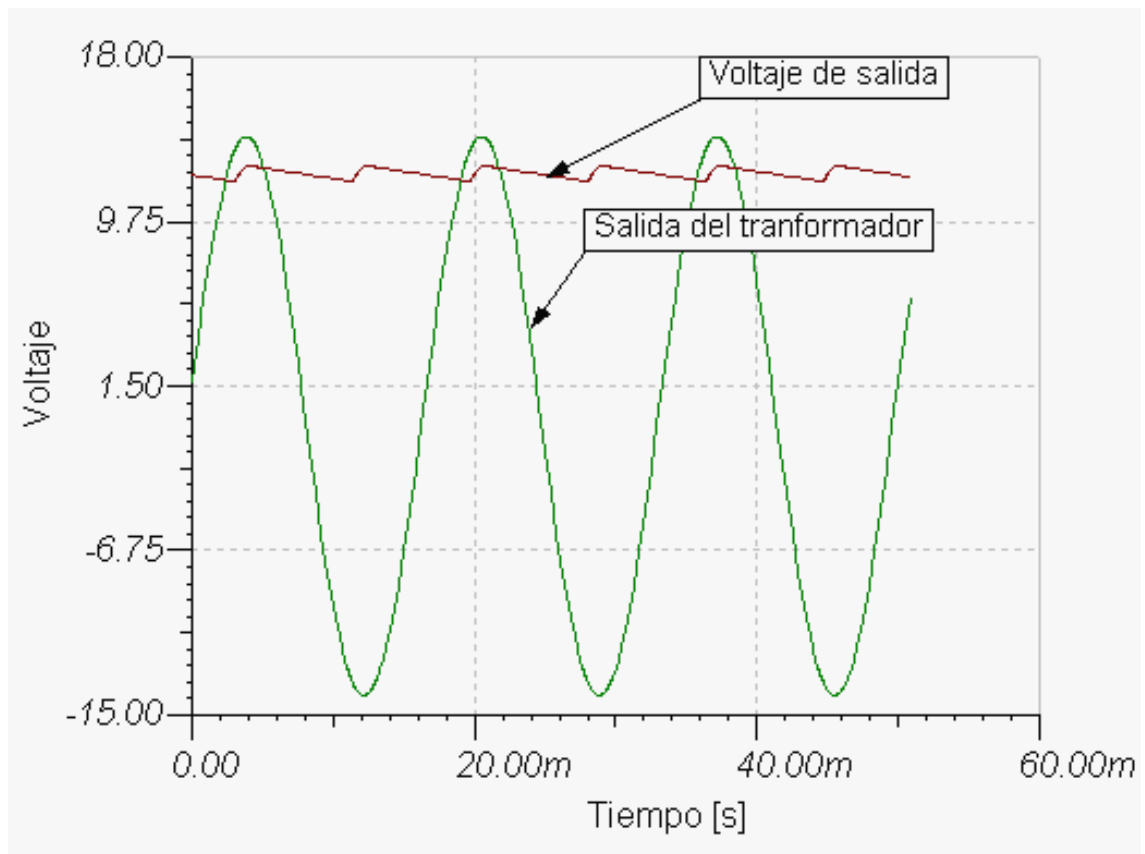
operacional recibe una señal directamente del oscilador, rectificada en media onda por el módulo 30-1751, la cual es conectada a la entrada negativa del amplificador operacional y en la entrada positiva del mismo la señal en corriente continua del disco variador de potencia que actúa a modo de un divisor de voltaje variable. Dicho divisor de voltaje esta polarizado con 12 V de la fuente del controlador. La forma de las señales de entrada a esta etapa son las que se observan en la figura 2.20.



**Figura 2.17 señal rectificada en onda completa.**

Dicho amplificador operacional esta conectado como se observa en la figura 2.21, para restar la señal del divisor de voltaje (variador de potencia) con la que llega del oscilador y amplificarla con la relación que muestra la siguiente función de transferencia:

$$V_o = \frac{R_{retro}}{R_{entrada}} (V_1 - V_2) \cong 31 \cdot (V_1 - V_2)$$



**Figura 2.18 grafica donde se ve la señal de salida del transformador y la misma señal después de ser rectificadada y filtrada.**

Donde:

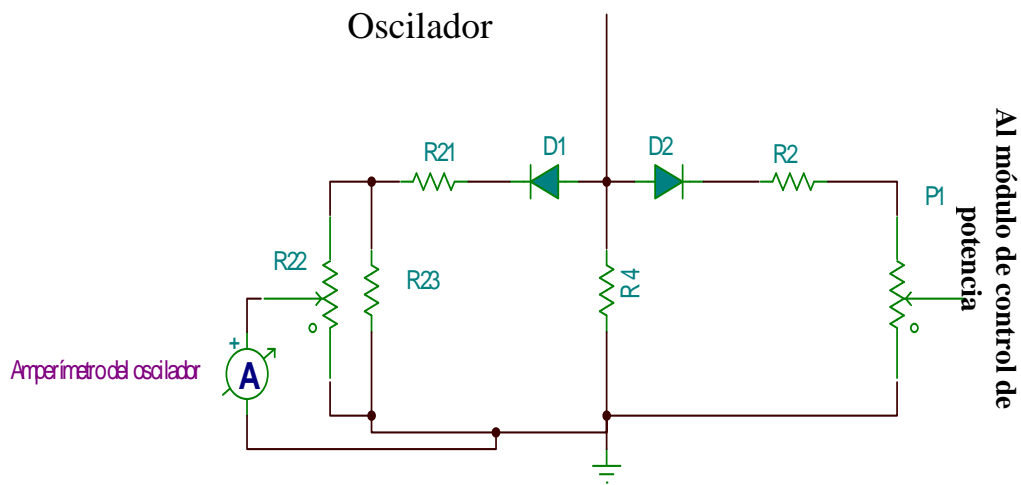
$V_1$  es la señal retroalimentada que llega desde el oscilador

$V_2$  es la señal continua que llega desde el divisor de voltaje

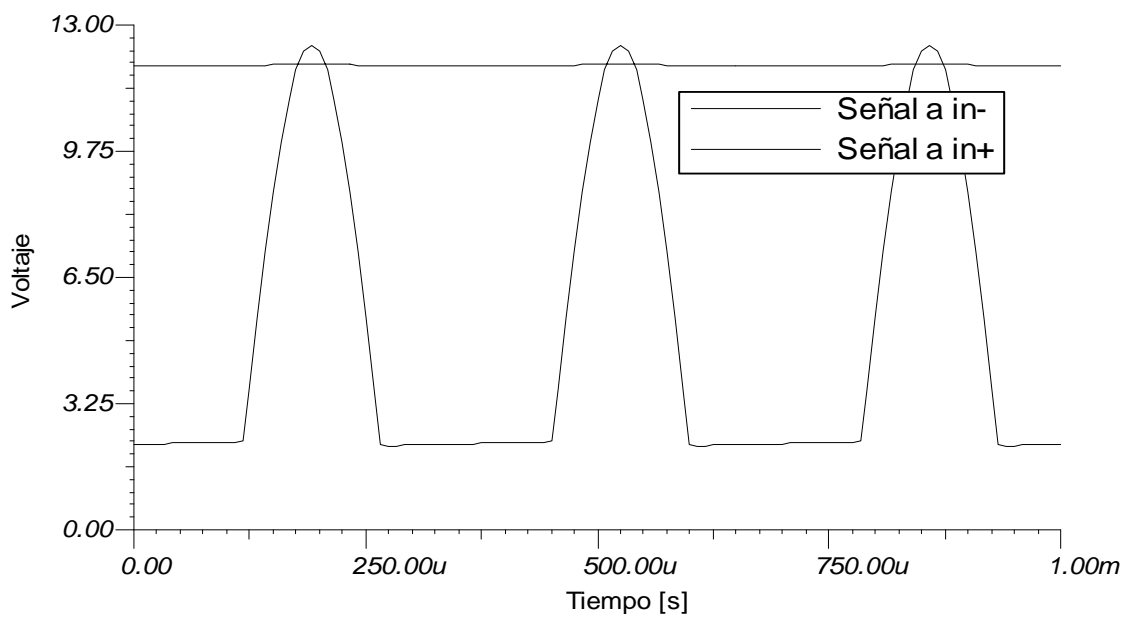
$V_o$ = señal de salida del amplificador operacional

$R_{retro}$ = es el valor en Ohms de la resistencia que cierra el lazo del amplificador operacional

$R_{entrada}$ = es la resistencia que se encuentra conectada a la entrada negativa del amplificador operacional

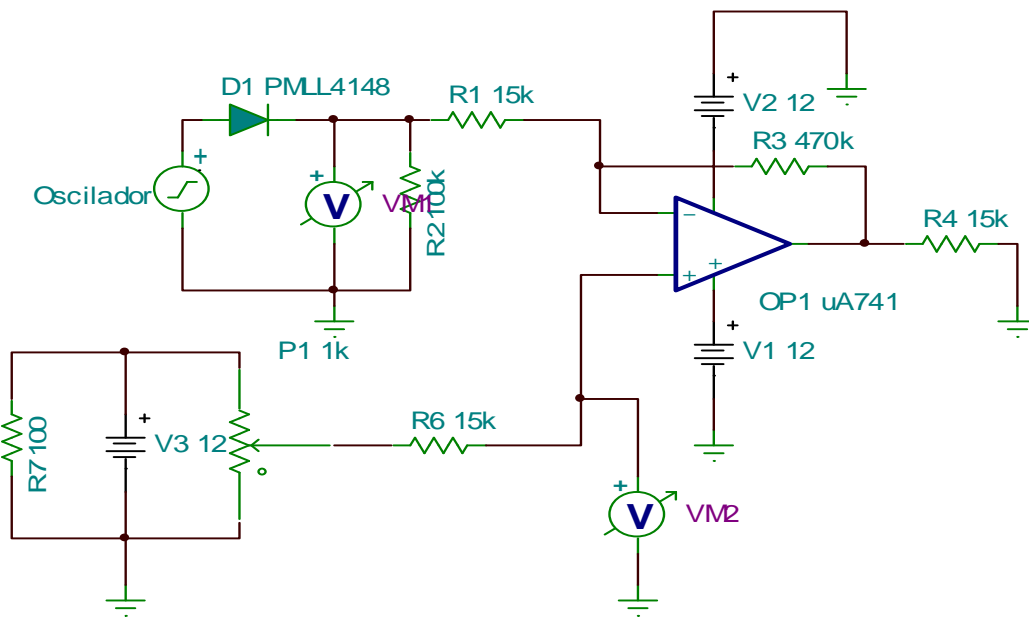


**Figura 2.19. Módulo Stanelco 30-1751**



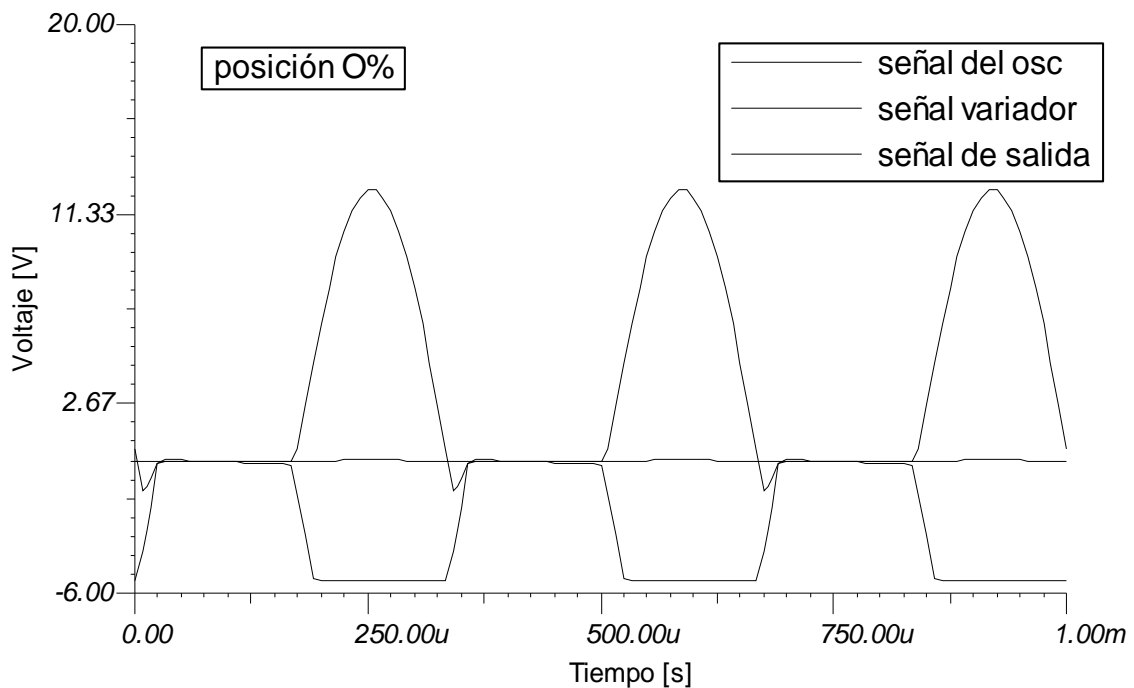
**Figura 2.20. Oscilograma de las señales de entrada a la primera etapa del circuito de control de potencia**



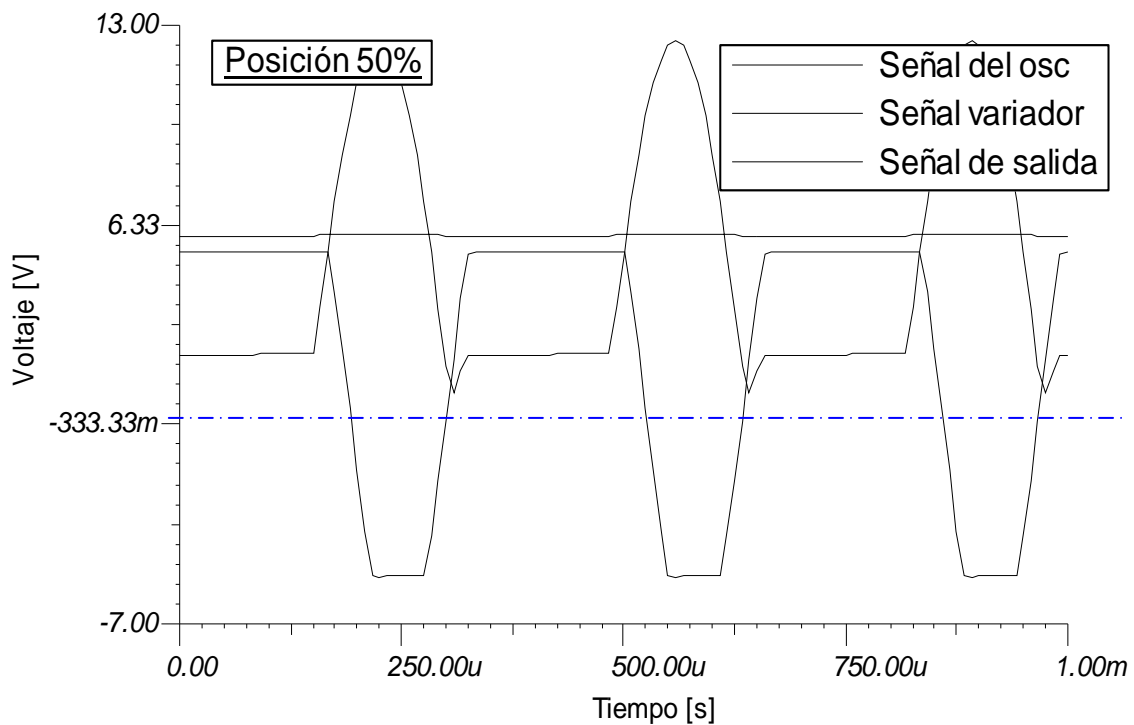


**Figura 2.21. Diagrama electrónico de la primera etapa del controlador de potencia**

Cuando el variador de potencia se encuentra en 0% la señal resultante el oscilograma de la figura 2.24.



**Figura 2.22. Salida de la primera etapa del amplificador operacional cuando el variador se encuentra al 0%.**



**Figura 2.23. Salida de la primera etapa del amplificador operacional cuando el variador se encuentra al 50%.**

En el cual podemos comprobar que la señal de salida es la resta de la señal del divisor menos la señal rectificadora que viene del oscilador resultando a la salida del amplificador operacional una señal casi cuadrada en sentido negativo.

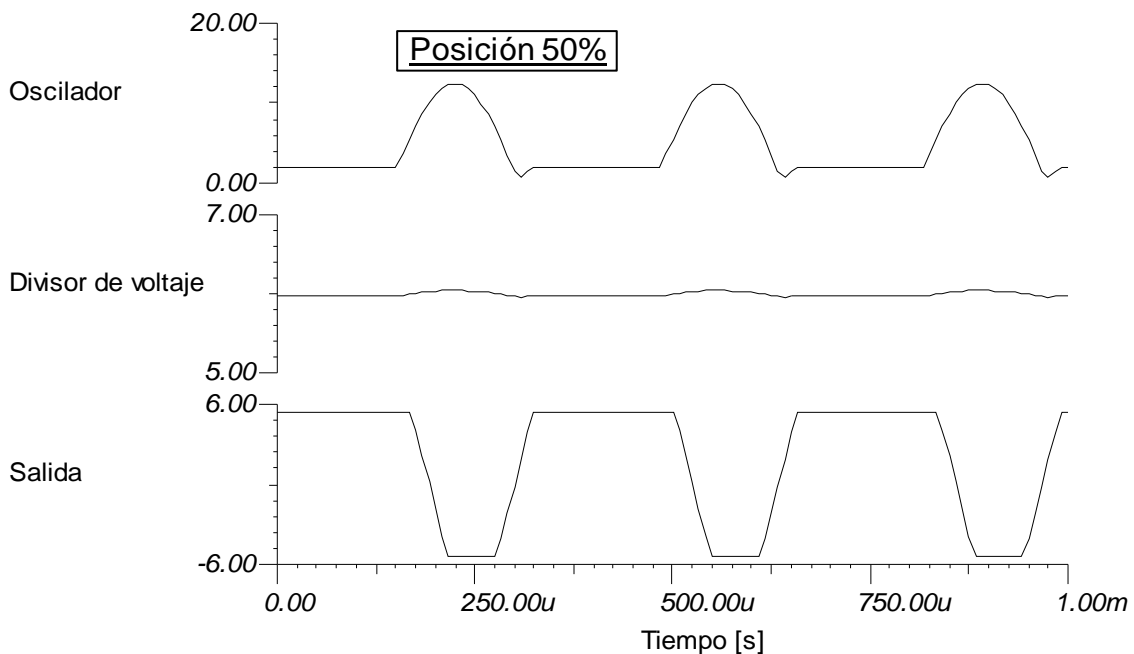
Cuando el variador esta a la mitad de su posición se tiene el siguiente oscilograma de la figura 2.23 y 2.24.

De este oscilograma podemos sacar algunas observaciones en cuanto al comportamiento de la señal eléctrica de salida, entre estas observaciones están que al subir el valor de corriente directa que viene del variador esta etapa compara las señales y hace que el valor de la señal promedio de salida aumente y otra conclusión sería que el amplificador esta diseñado para que al haber una pequeña diferencia tanto positiva como negativa se vaya a saturación para que llegue a su máximo valor en amplitud. Cuando está a máxima potencia la salida que se obtiene la imagen de la figura 2.25.

Aquí lo que podemos ver es como la señal va cambiando con respecto a la posición del variador de potencia.

La segunda etapa del control es un simple restador inversor que resta la señal que le llega de un divisor de voltaje variable de corriente continua, que se alimenta de la línea de alto voltaje que alimenta al bulbo principal (7, 500V), con la señal de la primera etapa y la amplifica e invierte con la siguiente relación:

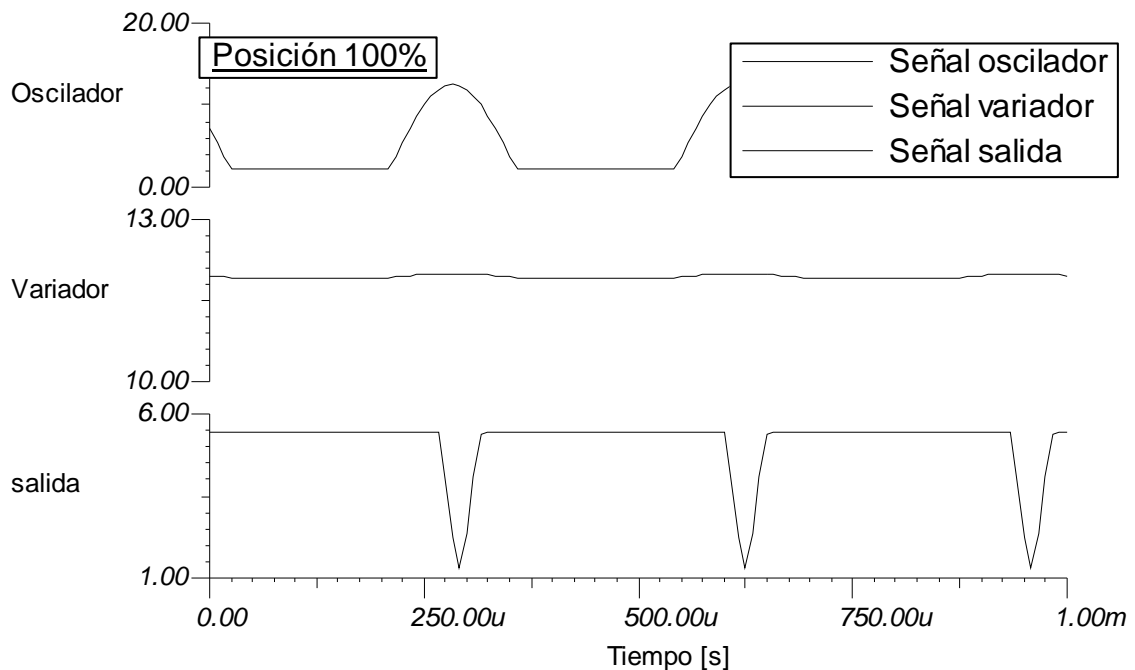
$$V_{SALIDA} = -\frac{R_{RETRO}}{R_{ENTRADA}}(V_{ENTRADA})$$



**Figura 2.24. Salida de la primera etapa del amplificador operacional desglosada cuando el variador se encuentra al 5 0%.**

Al entrar estas distintas señales en la segunda etapa se obtiene una señal de salida que controlará los transistores TR5 y TR6, cambiando la referencia del bulbo rectificador de alto voltaje PY 500A cuyo diseño originalmente está pensado como diodo en el booster de una televisión, manejando altos voltajes hecho que lo hace adecuado para las necesidades del oscilador del horno. El cambiar la referencia tiene el efecto de introducir una señal cuadrada

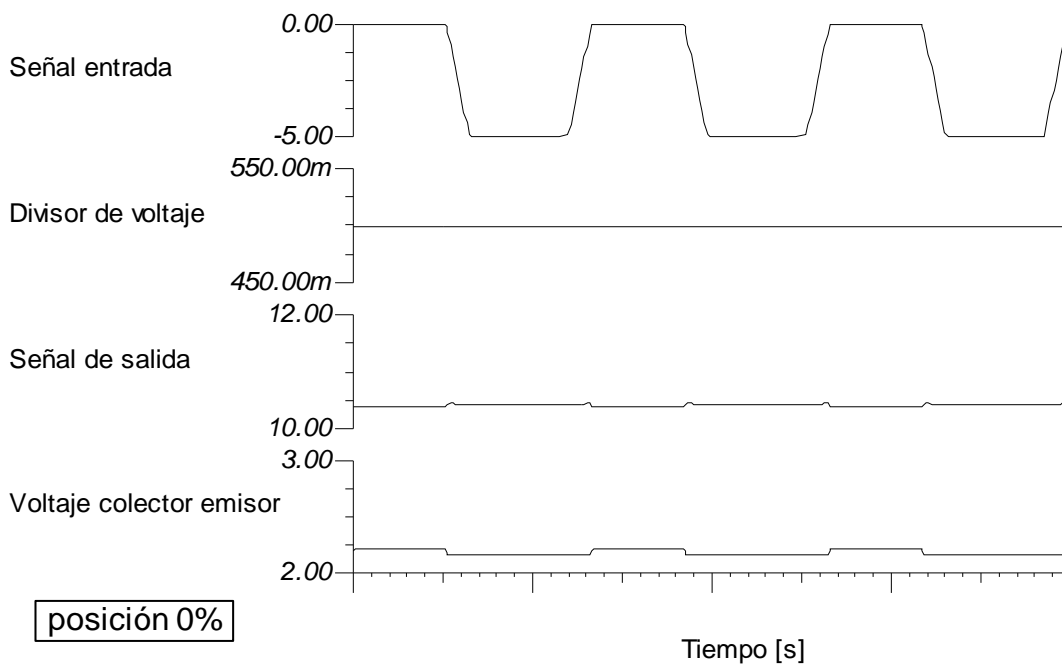
sincronizada con el oscilador cuya oscilación principal está en fase con la señal del oscilador.



**Figura 2.25. Salida de primera etapa del amplificador operacional desglosada cuando el variador se encuentra al 100%.**

Vemos en los siguientes oscilogramas como se comporta la señal que sale esta segunda etapa. Cuando el variador de potencia está en la posición mínima la señal de entrada de esta segunda etapa es una cuadrada completamente de polaridad negativa (alterna de cero a  $-V$ ) que es restada con la señal del divisor de voltaje al ser la señal del divisor pequeña pero de signo positivo la resta da una señal negativa que es invertida obteniendo a la salida una señal del valor del voltaje de saturación positiva que ira a la base del transistor de potencia este transistor al haber voltaje de saturación empezará a conducir y reducirá al mínimo la diferencia de potencial entre colector y emisor de tal manera que el diodo PY500A estará más cerca a potencial de tierra esto reducirá el voltaje entre reja y cátodo que es el que controla el alto voltaje que maneja el bulbo (Voltaje placa-cátodo) de esta manera se reduce el voltaje de salida y consecuentemente la potencia de salida será mínima que es lo que se desea. Ahora el siguiente grupo de señales muestra como se comporta la segunda etapa cuando el selector se encuentra justo a la mitad, en ese caso la

señal de entrada Será una señal cuadrada que cambiara de V+ a V- al comparar esta señal con la señal del divisor de voltaje fijo se obtendrá una señal cuadrada que variara de V+ de saturación a cero, esta señal se introducirá como ya se explicó anteriormente a la base de un transistor y tendrá el efecto de hacer conducir al transistor cuando la señal está en alto y dejar de conducir cuando esta en bajo, consiguiendo que el voltaje colector- emisor este regulado inversamente por esta señal de salida. El efecto conseguido es entonces variar de forma periódica y de modo sincrónico el voltaje que existe entre reja y cátodo con lo cual disminuimos por fuerza la potencia entregada por el horno a la bobina de carga, donde estará alojado el crisol que contendrá el material a fundir.

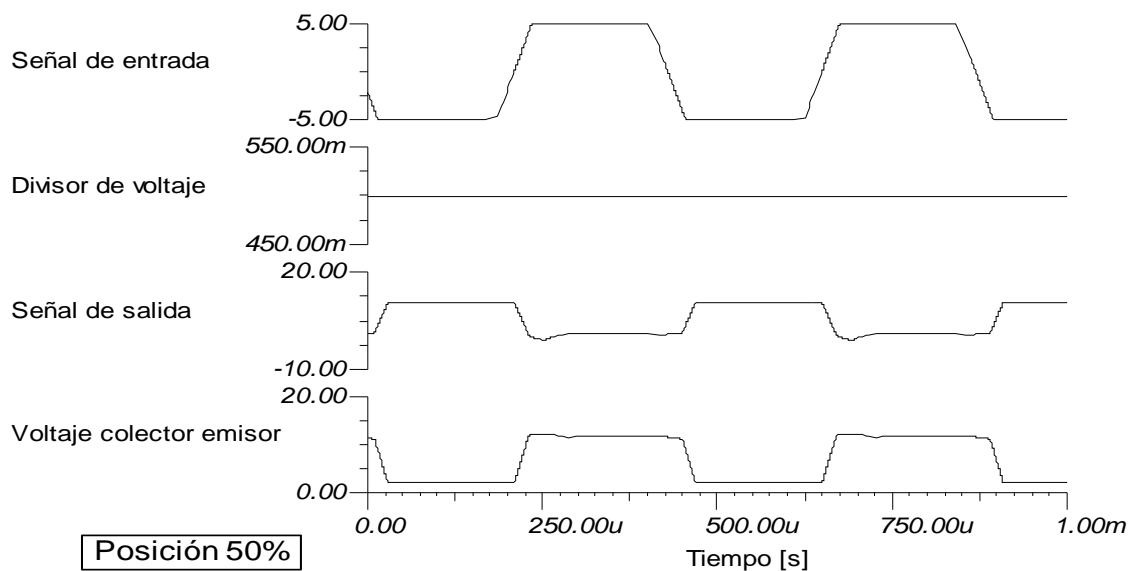


**Figura 2.26 Salida de la segunda etapa del amplificador operacional desglosada cuando el variador se encuentra al 0%.**

El siguiente caso es cuando el variador de potencia esta ubicado en la posición de máxima potencia en este caso vemos que la señal de entrada es mayor en todo momento que la señal del divisor de voltaje de tal manera que el circuito

efectuara la siguiente operación: 
$$V_{Sal} = -\frac{150K}{15K}(V_{div} - V_{ent}).$$

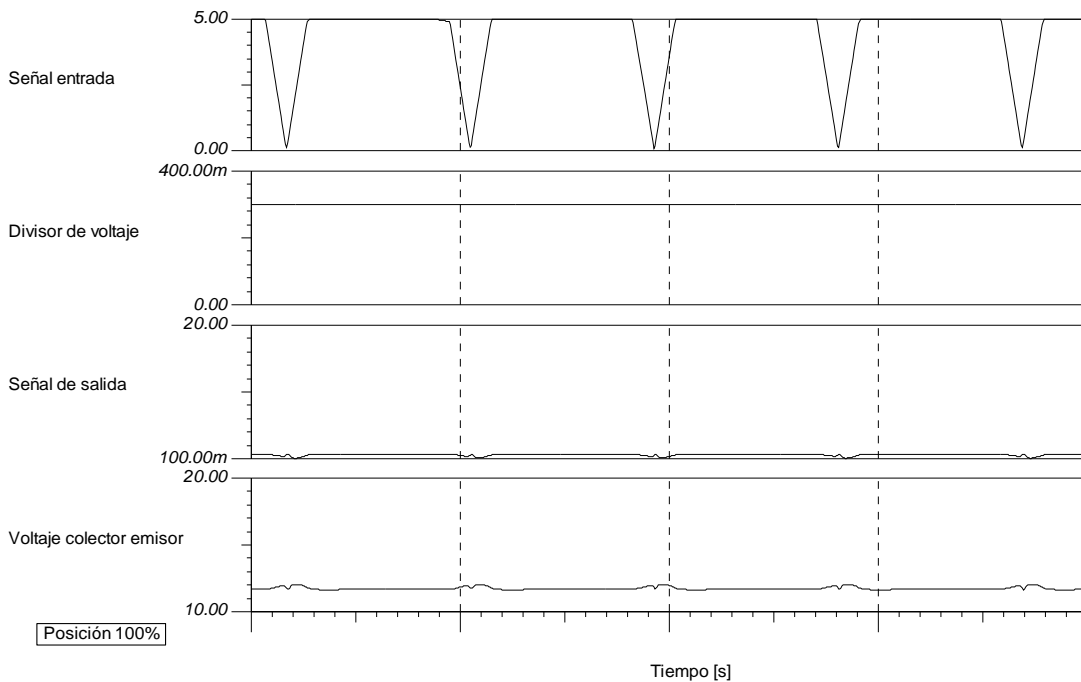
El resultado de esta operación haría que el resultado se fuera a saturación negativa inmediatamente en casi todo el intervalo, es en este caso cuando entra en operación el transistor de baja potencia TR1 su función es evitar que la salida tome un valor negativo y sólo permite que llegue a cero al tener una señal con voltaje cero los transistores entran en estado de corte que es cuando en la base del transistor no se encuentra una corriente suficiente para permitir el paso de electrones del material N del colector al material N del emisor, de esta, manera tenemos un circuito abierto que como se ve en la grafica tiene el mayor voltaje posible entre colector y emisor, esto eleva el voltaje reja cátodo y aumenta la corriente a su vez en el circuito conectado a la placa y al cátodo.



**Figura 2.27. Salida de la segunda etapa del amplificador operacional desglosada cuando el variador se encuentra al 50%.**

Este circuito de control cuenta con un sistema compensador de voltaje, lo que significa que en caso de que el voltaje trifásico de alimentación general no sea exactamente igual al recomendado por el fabricante se hará automáticamente un ajuste, por supuesto no debe ser demasiado grande la divergencia en el voltaje de alimentación.

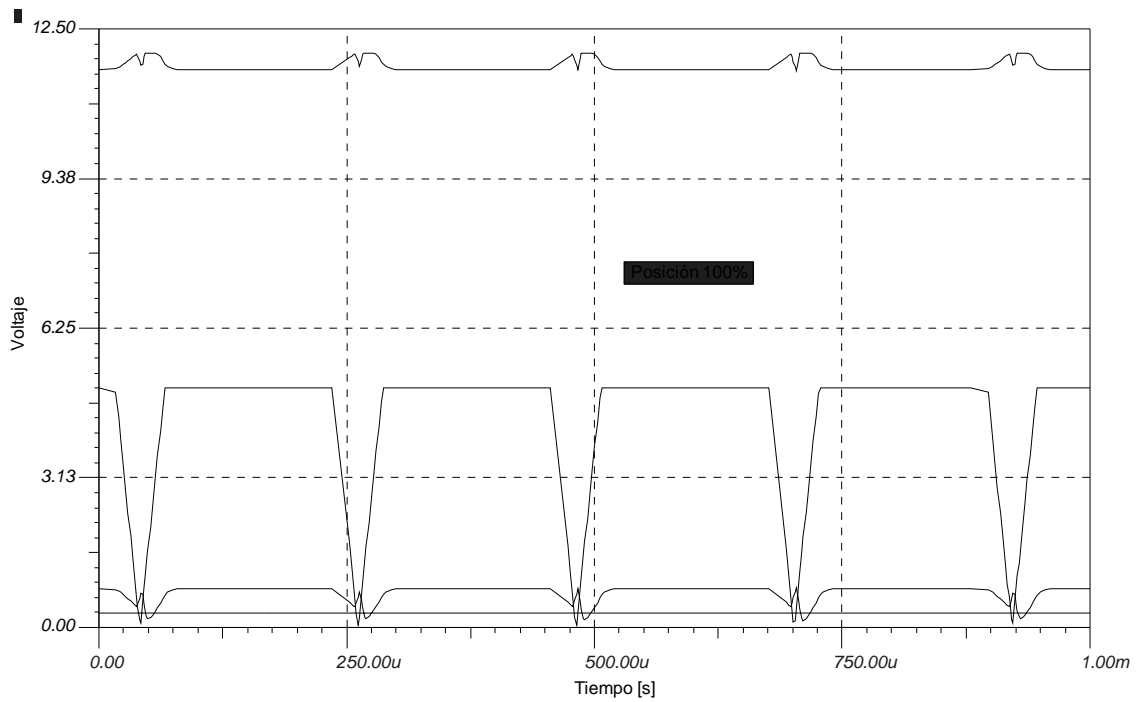
El diagrama electrónico completo del control de potencia será el mostrado en la figura 2.30



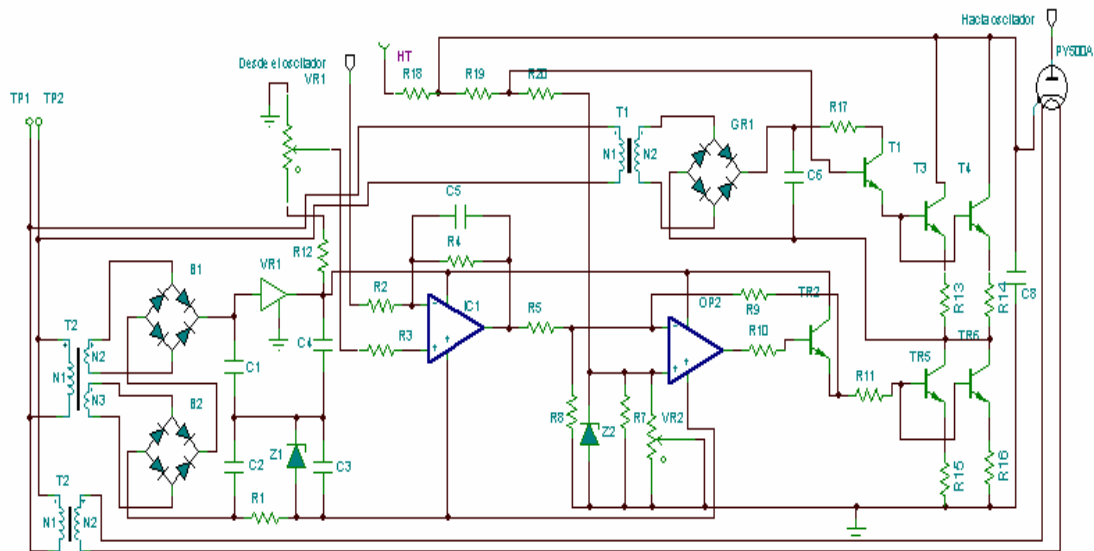
**Figura 2.28 Salida de la segunda etapa del amplificador operacional cuando el variador se encuentra al 100%.**

Este sistema de control, es conveniente hacer énfasis en que parte de circuitos y dispositivos de baja potencia, de bajísimo costo y de amplia difusión es lo que cualquier buen diseñador busca en casi todas las aplicaciones, por varias razones que a continuación enunciaré:

- En caso de descompostura es fácil encontrar TODOS los componentes originales, es decir no habrá necesidad de buscar un equivalente y hacer adaptaciones.
- También en el mismo caso de una descompostura es económico el reemplazo de los componentes, incluso cambiarlos todos a un muy bajo costo.
- De igual modo en el tiempo en que se construyó por ser componentes muy populares era fácil encontrar sus hojas de especificaciones y sus gráficas de características de desempeño típico (Typical performance characteristics).

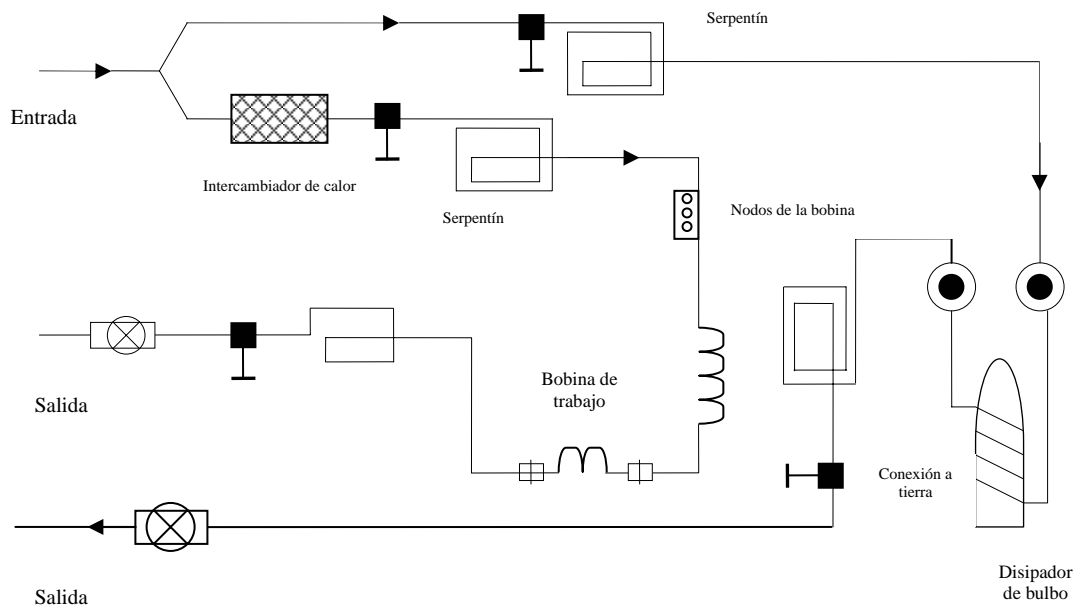


**Figura 2.29 Salida de la segunda etapa del amplificador operacional cuando el variador se encuentra al 100%.**



**Figura 2.30. Diagrama completo del control de potencia 30-2126C**





**Figura 2.31. Circuito hidráulico interior del horno donde se observan sus componentes principales**

## 2.4 Circuito hidráulico del horno de inducción

Este circuito tiene el propósito de mantener refrigerado mediante circulación de agua los circuitos de alta potencia a la temperatura óptima de trabajo, para esto hay que implementar todo un mecanismo que haga circular agua de refrigeración.

El diagrama del circuito hidráulico interno del horno de inducción por radiofrecuencia es el que se muestra en la figura 2.31.

En la figura anterior (Figura 2.31) puede verse las conexiones con las que cuenta el aparato desde la fabrica, donde destaca el Intercambiador de calor el cual es un radiador con tubos metálicos de diámetro pequeño (1/4 de pulgada) los cuales tienen soldadas aletas de disipación metálicas con el objeto de aumentar el área de disipación, el Intercambiador de calor que acabo de describir tiene la ventaja que ayuda a mantener libres de polvo los dispositivos que forman el oscilador y la fuente de poder que permite expulsar el calor sin meter aire forzado del exterior que con mucha probabilidad introduciría polvo, como ya dije y humedad que se acumularían en los componentes pudiendo

estos dos ser variables impredecibles que podrían producir descomposturas y fallos dentro del oscilador del sistema.

Los fabricantes exigen que la circulación de agua refrigerante cumpla ciertas condiciones:

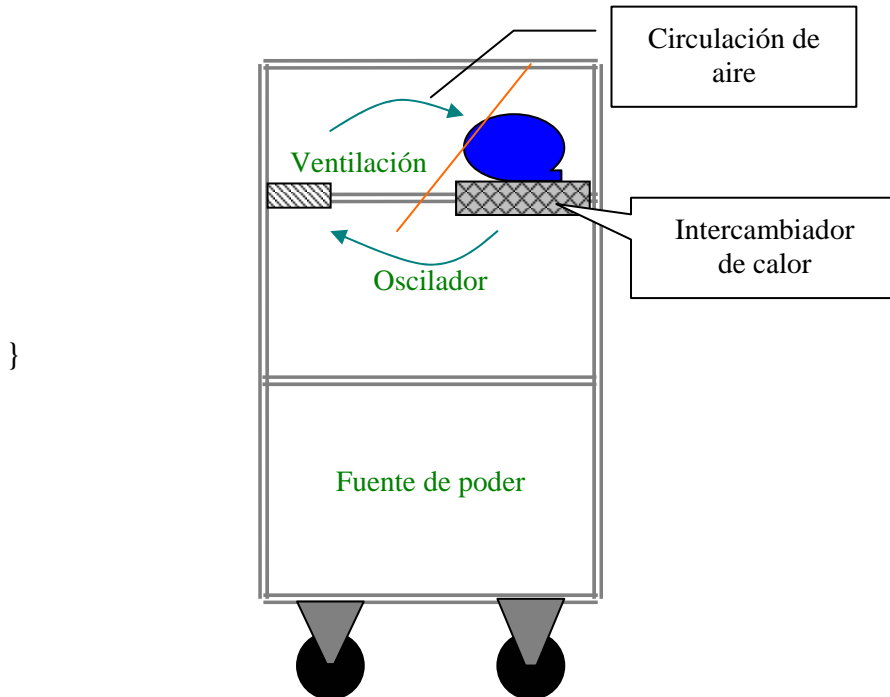
- Un caudal con un rango de:
  - 3.5 galones por cada minuto para el bulbo
  - 1.5 galones por cada minuto en el oscilador
  
- Un circuito cerrado de agua, puesto que con un caudal tan grande utilizar un sistema abierto no se permitiría, por razones éticas y ecológicas.
  
- Recomienda que el sistema no tenga componentes ferrosos en contacto con el agua (como es común en las bombas usadas en México cuyo impulsor es de hierro colado) para evitar herrumbre que cambie las propiedades del agua de enfriamiento.
  
- Es necesario la colocación de un sistema de filtrado con malla del número 100 (mesh 100).
  
- El agua deberá ser desionizada o que cumpla con las siguientes especificaciones:
  - Conductividad de 10-100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
  - Disolución de sólidos de 30 partes por cada millón
  - Con un valor de pH de 6.5-7.5
  
- Al existir alto voltaje en el ánodo del bulbo, se provoca en consecuencia en el agua una acción electrolítica que deposita partículas en las mangueras y tuberías por lo que cada seis meses será necesario destaparlas con una disolución al 10% de agua con ácido acético que disolverá las incrustaciones

- En cuanto a la presión hidráulica del circuito se recomienda que el diferencial de presión entre la entrada y la salida no sea inferior a 40 p.s.i. (40 libras sobre pulgada cuadrada equivalente a 2.72 atmósferas) y que la presión de entrada no exceda las 75 p.s.i. (5.1 atmósferas).
- La máxima temperatura de entrada es de 30° C. El mínimo de temperatura debe ser establecido en base del punto de condensación ya que si es muy bajo puede presentarse rocío proveniente del agua ambiental lo cual puede producir una ruptura en la rigidez dieléctrica del espacio entre las espiras y que se produzca una serie de chispazos indeseables.

Una vez dentro del sistema el agua se repartirá en dos circuitos uno de refrigeración del oscilador ("TANK") que exigirá un flujo de 1.5 galones ingleses por cada minuto (6.82 LPM) y otro destinado al bulbo de potencia que deberá tener un flujo mínimo de 3.5 galones ingleses por cada minuto (15.92 LPM) como mencione anteriormente.

Saliendo del equipo regresará al contenedor para tener un circuito hidráulico cerrado.

El flujo debe ser el exigido en todo momento, hasta en las pruebas preliminares porque el sistema no encenderá ni el panel de control, lo que resulta en la imposibilidad de encender y controlar el oscilador.



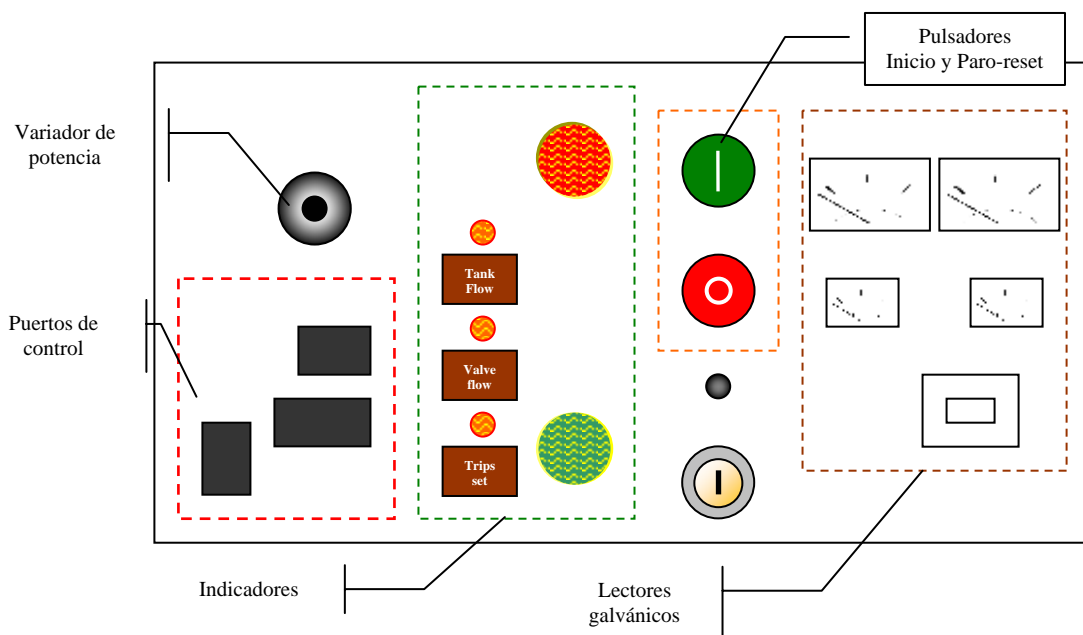
**Figura 2.32 Diagrama donde se observa la circulación de aire dentro del horno y su paso a través del intercambiador de calor interno**

**2.5 Circuito de control e interfaz con el operador**

Al ser el horno de inducción un sistema que maneja altas frecuencias, altos voltajes que resultan a su vez en altas corrientes, se cuenta con varios dispositivos electrónicos e hidráulicos que se encargan de controlar tanto la temperatura como la corriente eléctrica del bulbo tríodo principal que a pesar de estar diseñado para ser robusto y manejar alta potencia hay parámetros que si no se supervisan existe la posibilidad de que se lleguen a disparar o a ir a pique lo que podría, desde provocar un apagado súbito o desequilibrado del horno y dañarlo o hasta incluso destruirlo irremediablemente. Es por esa razón que el horno cuenta con un grupo de pasos que hay que seguir para encenderlo para mantenerlo en operación y para su apagado con seguridad, estos pasos se deben seguir teniendo en cuenta en todo momento las lecturas obtenidas de los varios indicadores con que cuenta, todos los indicadores y carátulas de los medidores se alojan en el panel de control, cuyo esquema se muestra en la Figura 2.33.

Y cada uno de estos tiene la función que se indicará a continuación:  
Primero están los indicadores luminosos:

- “VALVE FLOW” (flujo del bulbo) indica que el flujo de agua destilada es suficiente en el circuito hidráulico que enfría el bulbo trío del oscilador. Es necesario e indispensable que se encuentre encendida en caso contrario no encenderá el horno o ya encendido se apagará si el flujo es insuficiente.
- “TANK FLOW” (flujo del oscilador o tanque) indica que el flujo de agua destilada es suficiente en el circuito hidráulico que enfría el circuito oscilador y la bobina de trabajo. Es necesario e indispensable que se encuentre encendida en caso contrario no encenderá el horno o ya encendido se apagará si el flujo es insuficiente.



**Figura 2.33. Imagen de el panel de control del todos los indicadores que tiene a su disposición el usuario**

- “TRIPS SET” nos indicará que el aparato esta conectado y que circula corriente eléctrica por los circuitos de control de encendido, de apagado y de apagado súbito, así como del circuito del ventilador eléctrico interno que impulsa aire a través del radiador intercambiador de calor.
- “RF ON” (Radiofrecuencia encendida) es el indicador principal de que el oscilador(o circuito tanque como también se le llama) está operando.
- “READY” (preparado, a punto) indica cuando todo el sistema esta preparado para el encendido del horno.

Después están los indicadores cuantitativos:

- “Hour-meter” es el indicador que nos muestra las horas efectivas de funcionamiento continuo que tiene el aparato.
- Asimismo hay en el panel existen galvanómetros con las lecturas de las variables eléctricas más importantes del sistema principalmente a las variables del bulbo trío, como son:
  - Corriente de ánodo: es el numero de cargas expresadas en Coulomb/segundo o Ampere que son inducidas desde el filamento de caldeo hacia el cátodo (placa)
  - Voltaje de ánodo: es la diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo del bulbo y el cátodo, que este último en este caso, referido directamente a la tierra del sistema (EP1).
  - Corriente de reja (grid current) es el número de Coulombs por cada segundo que pasan a través de la reja, este valor es de pocos miliamperes ya que los bulbos son dispositivos amplificadores controlados por voltaje por esta razón es muy

poca la corriente que fluye de esta manera y se busca que sea lo más pequeña posible.

- Corriente en el oscilador (tank current) es el parámetro más importante para el usuario final porque es esta corriente la que permite saber cuanta potencia se le suministra a la carga que tenemos en nuestro horno (dicho sea la carga bajo la influencia de la bobina de trabajo).

También en el panel están los controles del aparato como el variador de potencia, el botón de inicio del oscilador (start), el botón de paro y reset y el interruptor de seguridad con llave. Todos estos controles forman parte del circuito que gestiona el arranque, el apagado y el reset del horno.

El instructivo del aparato tiene un número de pasos que hay que seguir para encenderlo, cada paso involucra una serie de movimientos internos que explicaré brevemente:

La primer instrucción que dan es echar a andar el flujo de agua de los circuitos hidráulicos de refrigeración, colocar el interruptor con llave de la posición de "OFF" a la posición "TEST" este movimiento energizará el ventilador trifásico que forzará el aire a través del intercambiador de calor con el propósito de enfriar el aire, también con esta posición se dará voltaje a los transformadores de dos fases T2 y T3. T2 es el transformador que alimenta el filamento de caldeo del bulbo, que provocará la "Nube de electrones" que pasara del cátodo al ánodo con una corriente de 21 Amperes este transformador posee varias salidas en el secundario con el fin de tener  $9.5 \pm 5\%$  VCA.

T3 es el transformador que alimenta el circuito de interfaz con el operador, el cual sólo encenderá si se cumplen los siguientes requisitos: primero que el ventilador esté operando, segundo que el flujo de agua de ambos circuitos sea suficiente, tercero que la corriente de reja y la corriente de cátodo sean menores o iguales a ciertos valores de seguridad (120 mA para el caso de la

reja y 7.5 A en el caso del ánodo) y cuarto que la temperatura del interior de gabinete es la correcta.



## **CAPÍTULO III**

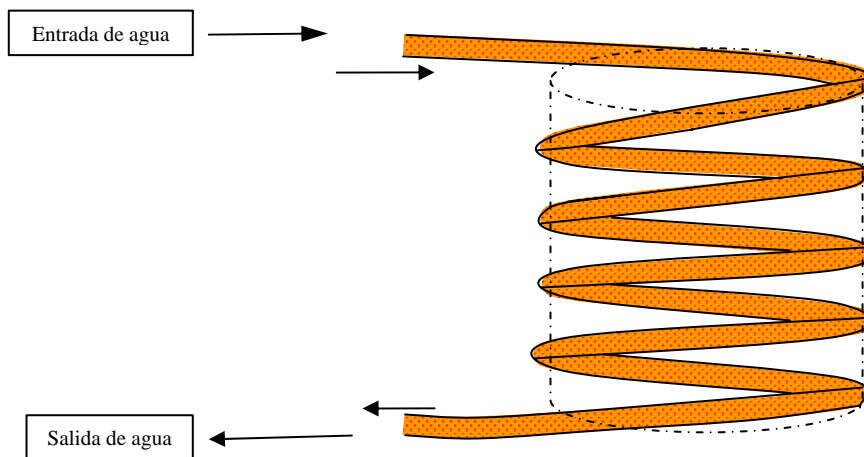
### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

---

El primer problema que se tiene que enfrentar al querer utilizar el horno para crecer cristales es encender el horno. Porque al requerir una alimentación eléctrica con una línea trifásica de 440 V de fase a fase que soporte una corriente de 40 amperes durante largos períodos, porque los periodos de crecimiento de cristales son muy largos, lo que significa varias horas o días incluso durante las cuales no debe haber variación en la potencia que recibe el aparato, una variación podría tener una repercusión muy importante en el cristal que se esta creciendo.

El instituto cuenta con instalaciones apropiadas para conectar diversos aparatos de distintas consumo y necesidades de potencia, porque fue planeado desde un principio para que fuera un centro de investigación, que utilizaría aparatos de alto consumo de potencia eléctrica y que no pueden carecer ni un instante de abastecimiento eléctrico sin descomponerse irremediablemente, implicando ese simple hecho una gran pérdida económica, como es el caso de los aparatos que manejan altas energías como son los microscopios electrónicos, aceleradores de partículas, maquinaria industrial en el taller, etc. Es por eso que se tiene preestablecido que no va a haber ningún problema de falta de alimentación y sólo será necesario obtener el equipo adecuado para la potencia requerida.

Existe un problema en la operación de la “Bobina de trabajo” la cual no fue almacenada apropiadamente lo que ha provocado que sufra de deformaciones que por fuerza modifican su inductancia y como es parte de la bobina del oscilador pueden resultar en que el sistema no oscile y se vea la necesidad de hacer modificaciones y ajustes.



**Figura 3.1 Dibujo de la bobina donde se ve la dirección de entrada y salida del agua**

Un problema adicional es que el módulo que controla el motor que se encarga del giro y de la tracción de la barra no tiene ningún instructivo, el cual se encuentra extraviado y no se sabe a ciencia cierta cómo se conecta al motor ni se sabe si el sistema todavía funciona. Por lo cual será necesario investigar la electrónica del sistema así como el tipo de cables y conexiones que se van a requerir para conectar el motor, así como también se tiene que analizar cual es el mecanismo que hace que se pueda manejar el tiro y la rotación con un motor únicamente.

En cuanto lo que se refiere al circuito hidráulico de enfriamiento este se prevé que sea el principal problema para encender el horno y durante su operación a futuro ya que las necesidades específicas de flujo y calidad de agua que exige el fabricante hace que se tenga que utilizar elementos especiales para

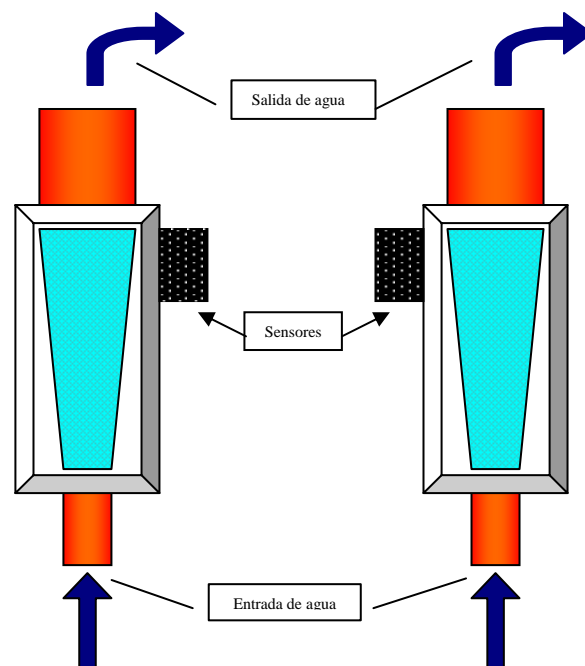
cumplirlos. Un ejemplo de estas exigencias vienen en el instructivo del fabricante, ahí se recomienda no usar ningún elemento ferroso ni en las bombas ni en las tuberías de conexión del agua. Esta exigencia se explica porque la herrumbre después de un tiempo de uso podría bloquear los delgados tubos del intercambiador de calor general y de el disipador del bulbo y también tapar las tuberías, asimismo este mismo herrumbre podría provocar que el agua actuará como una guía de onda imperfecta que traería multitud de inconvenientes, como fugas de potencias en la onda emitida y que pueden provocar calentamientos si se concentra esa fuga de potencia.

El flujo de agua como se dijo anteriormente tiene dos circuitos un largo y complejo, y uno corto con una tubería muy estrecha, en ambos debe estar garantizado el flujo en todo momento de operación puesto que a la entrada están colocados dos flujímetros calibrados a 1,5 galones por minuto (6.8 litros por minuto) para el circuito de la bobina inductora, y a 3.5 galones por minuto (15.9 litros por minuto) para el circuito del oscilador, y en especial para el bulbo tríodo. Estos sensores son tubos Venturi con un cilindro con aletas en el interior del Venturi, dicho cilindro esta fabricado por fuera con bronce y hierro en el interior. El agua entra en estos dispositivos de abajo hacia arriba y cuando el flujo es correcto el cilindro está en lo más alto y activa el sensor que habilita el arranque y también habilita que el horno permanezca encendido, si alguno de los cilindros desciende un poco se interpretaría como que el flujo esta interrumpido y se apagaría todo el horno súbitamente. En el caso de otro tipo de hornos el flujo de agua podría descender un poco sin problema, como es el caso del horno de efecto Joule mencionado al principio, en cambio en el horno de radiofrecuencia lo apagaría. Es impensable que se apague, el horno, de improviso durante un crecimiento automático, esta circunstancia obliga a utilizar un diseño de gran fiabilidad.

Todo el énfasis que se pone en este sistema hidráulico de refrigeración se debe a que por este sistema se deben disipar aproximadamente 22 KW

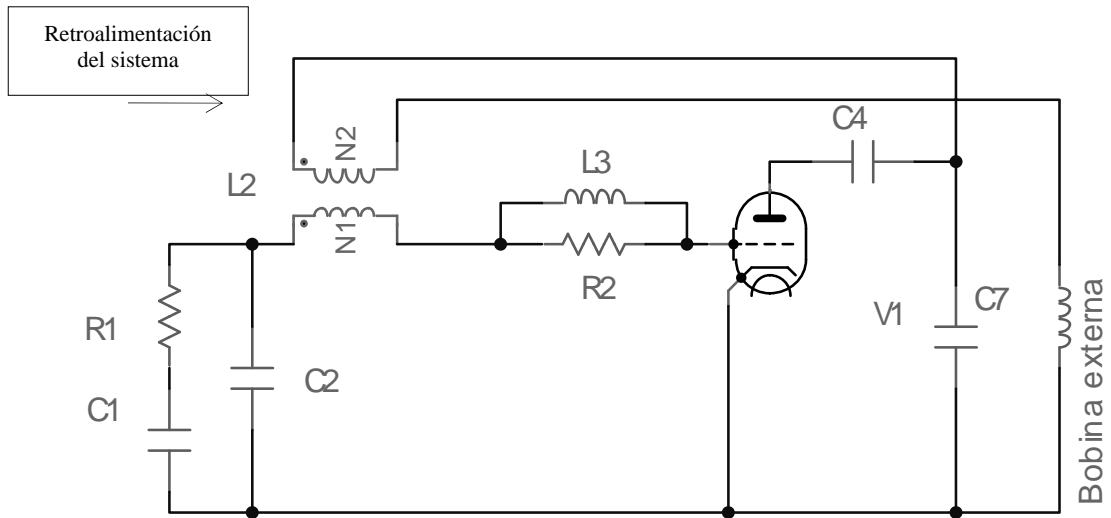
suficiente potencia como para mantener en funcionamiento 58 bombas de agua o 220 focos incandescentes (de 100 W).

También se debe establecer una serie de metodologías para dar mantenimiento al sistema de refrigeración y evitar el taponamiento de la tubería interna por una mala técnica de desagüe porque, aunque se tiene previsto utilizar agua destilada, la tubería naturalmente desprende partículas que forman sedimentos, estos sedimentos se deben evitar que formen una suspensión que entre en el horno y lo obstruya.



**Figura 3.2 Vista de los medidores de flujo de agua de enfriamiento con los que cuenta el horno**

Ya una vez logrado el encendido del horno tendrán que instrumentarse algunas pruebas para ver que en el sistema esté presente la oscilación, si no, habrá necesidad de ajustar la retroalimentación con el tornillo que para tal efecto dispone por un lado de un y que modifica la retroalimentación del sistema.



**Figura 3.3. Diagrama del oscilador donde se puede ver la retroalimentación vía las bobinas acopladas L2.**

## **CAPÍTULO IV**

### **RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL HORNO**

---

El primer problema a resolver es la alimentación eléctrica como expuse en el capítulo anterior, se tiene como premisa garantizar la calidad de la energía con el fin de evitar suspensiones en el suministro de cargas eléctricas o de circuitos enteros y que causa la interacción del equipo eléctrico y del sistema de suministro eléctrico.

Los ejemplos de problemas en la calidad de la energía son:

Interrupciones prolongadas. Las interrupciones prolongada serán un tipo de perturbación completamente impensable en el crecimiento de cristales porque al estar el material que formará el cristal derretido en el intervalo de 1300 a 1500 °C, es muy fácil perder el calor y conllevaría a la solidificación inmediata del fundente donde se encuentra introducida la semilla, que tomando en cuenta los costos de esos materiales es por sí misma una gran pérdida. La reactivación del proceso de crecimiento sería tardada, laboriosa y costosa, porque se tendría que colocar una nueva semilla de niobato de litio y se tendría que volver a elevar la temperatura del material dentro del crisol.

En cuanto al horno el reinicio de operaciones involucraría otro gran periodo de espera, porque para el reencendido se tiene que volver a activar la refrigeración de agua y de aire, externa e interna respectivamente, y además

poner a punto los bulbos que tiene el aparato, como ya se dijo es un bulbo tríodo y un bulbo diodo rectificador de alto voltaje, dicha puesta a punto es esperar el periodo que se requiere para calentar los filamentos de los bulbos, ya que estén a pleno se reenciende el horno por lo que habrá que verificar si se presenta la oscilación, que como ya se dijo anteriormente no necesariamente se presenta la oscilación y si se presenta hay que evitar que se sature el tríodo principal.

Interrupciones momentáneas: Estas interrupciones son pérdidas temporales de voltaje que pueden tener muchos orígenes, en el horno provocaría un paro súbito que obligaría al usuario a recurrir a acciones emergentes para salvar cristal.

La línea a la cual será conectada tiene una tensión de 6 KV la cual se encuentra desocupada entonces no habrá ninguna interferencia con otro sistema conectado.

Es importante, por lo tanto conectar un transformador reductor de voltaje que soporte la potencia aparente del sistema, tomando en cuenta que nuestros cálculos dan un factor de potencia para el horno de 0.95 y si asimismo tomamos en cuenta que la potencia efectiva máxima consumida es 52 KW, en base a la ecuación 4.1, y teniendo en mente que un factor de potencia de 0.95 que representa el  $\cos(\theta)$  siendo  $\theta$  el ángulo de desfase del voltaje con la corriente, por lo tanto  $\theta$  equivaldrá a 18.19 °:

$$S = P + jQ = S \cdot \cos \theta + S \cdot \sin \theta \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

S representa la potencia aparente expresada en VA

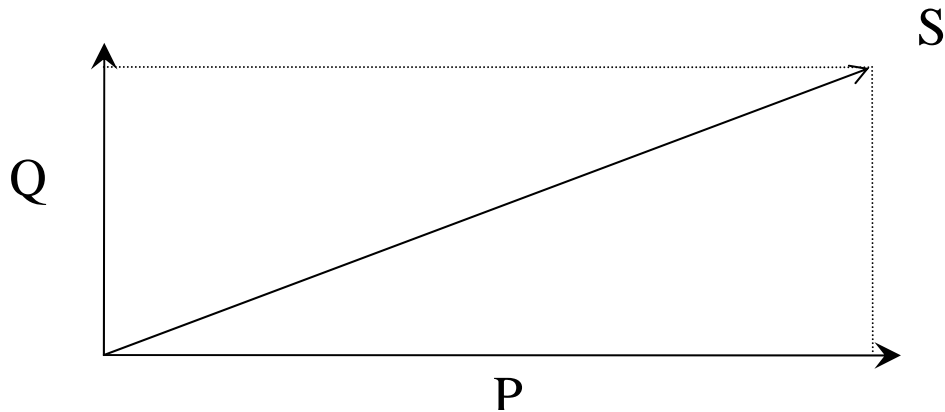
P es la potencia eficaz en Watts

Q es la potencia reactiva en VAR

$j$  es la raíz cuadrada de -1

$\theta$  es el ángulo de desfase de la corriente con respecto al voltaje

Una representación gráfica se da en el diagrama de Argand.



**Figura 4.1. Diagrama de Argand donde se ve la potencia reactiva, la activa y la aparente**

Se despeja de:

$$P = S \cdot Fp \quad \text{Ecuación 4.2.}$$

Por lo tanto

$$S = \frac{P}{Fp} = \frac{52[KW]}{0.95} = 54.73[KVA]$$

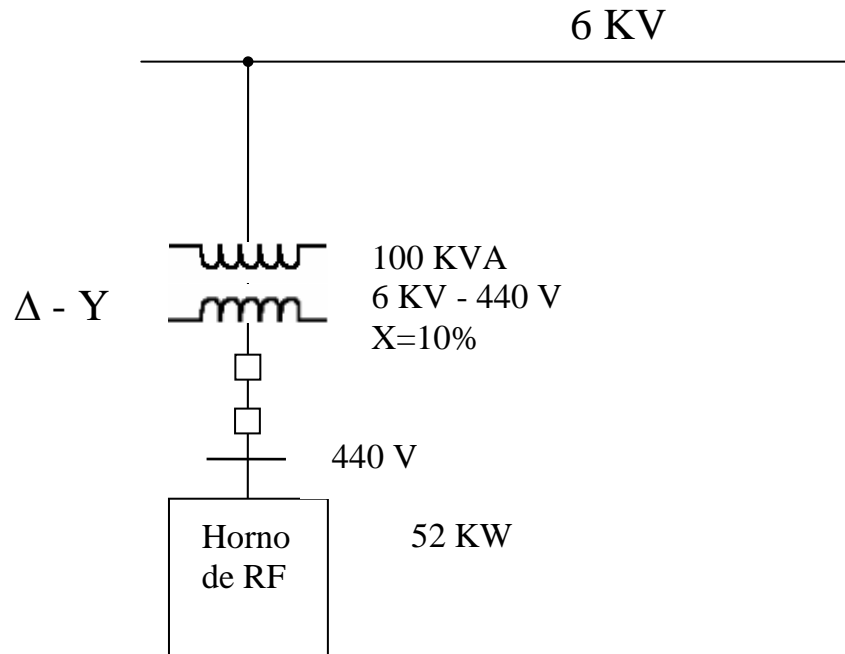
Este último valor es la magnitud de la potencia del aparato.

Basado en estos cálculos se tiene que escoger el transformador y el cableado en general que deben tener la suficiente robustez para soportar esta demanda de potencia. El transformador con el que se cuenta está diseñado para manejar 100 KVA nominales, por lo tanto la potencia que necesita el horno está debajo



de esta capacidad, esta situación nos garantiza que no habrá ningún problema, ya que esta muy por debajo de su potencia de trabajo.

La conexión final de abastecimiento del horno tiene el diagrama unifilar que se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.2. Diagrama unifilar de la conexión eléctrica del horno**

En cuanto a la bobina de trabajo esta tiene que tener de fábrica estas características:

- 6 vueltas
- 6 cm. de radio
- 9 cm. de longitud

Para estas bobinas de núcleo de aire o solenoides se cuenta con una fórmula empírica que nos permite calcular la inductancia de la bobina (dicha fórmula, que se puede ver en la ecuación 4.3) ha sido utilizada desde hace mucho tiempo por los investigadores del instituto.

Esta fórmula es la siguiente:

$$L = \frac{n^2 \cdot r^2}{23r + 25.4l}$$

Ecuación 4.3.

Donde:

L=Inductancia de la bobina de trabajo en microHenrys [ $\mu$ H]

n=número de vueltas

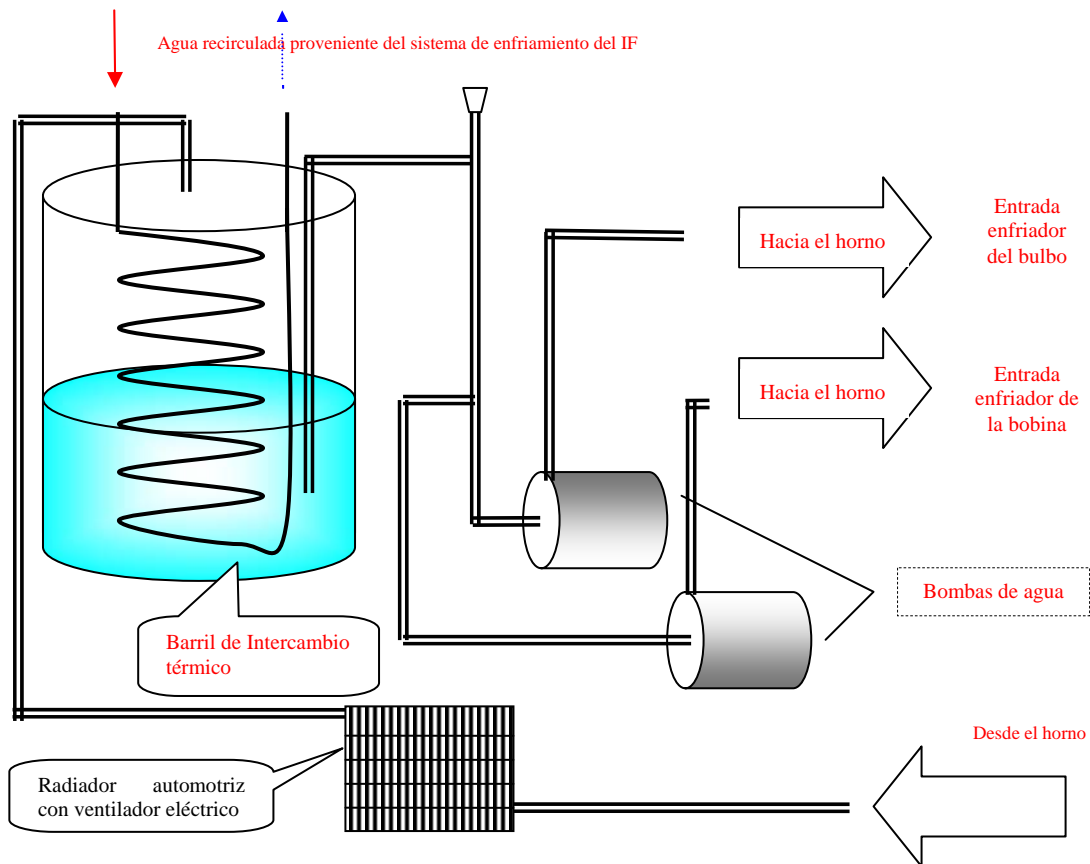
r=radio interno en centímetros

l= longitud total de toda la bobina

Esto significa que al salir de fabrica la bobina cuenta con una inductancia de 3.53 microHenrys esta inductancia esta alterada y se tendrá que rectificar la forma de la bobina para conseguir que no altere los valores del oscilador.

Como mencioné también en el capítulo anterior otro de los problemas que había que resolver es conseguir un sistema hidráulico que disipe 22 KW, que cumpla las condiciones de limpieza de impurezas tanto ferrosas como partículas suspendidas en el agua.

Por todo lo anteriormente mencionado se instaló un sistema refrigerante que proveerá de agua al sistema, consta de 2 bombas de 1.5 H.P. (1.1 KW) con impulsor de plástico que impulsará agua destilada de un contenedor hacia el interior del aparato, el contenedor de agua es un barril plástico con un tubo serpentín de cobre, en este serpentín se hará circular agua refrigerada del sistema central de refrigeración del Instituto de Física. Este sistema central de refrigeración es toda una instalación que disipa una enorme cantidad de calor residual proveniente de todos los aparatos de alta potencia del instituto consta en su etapa principal de un radiador semejante al de una planta termoeléctrica al cual se le introduce aire forzado y se hace fluir agua sobre este.



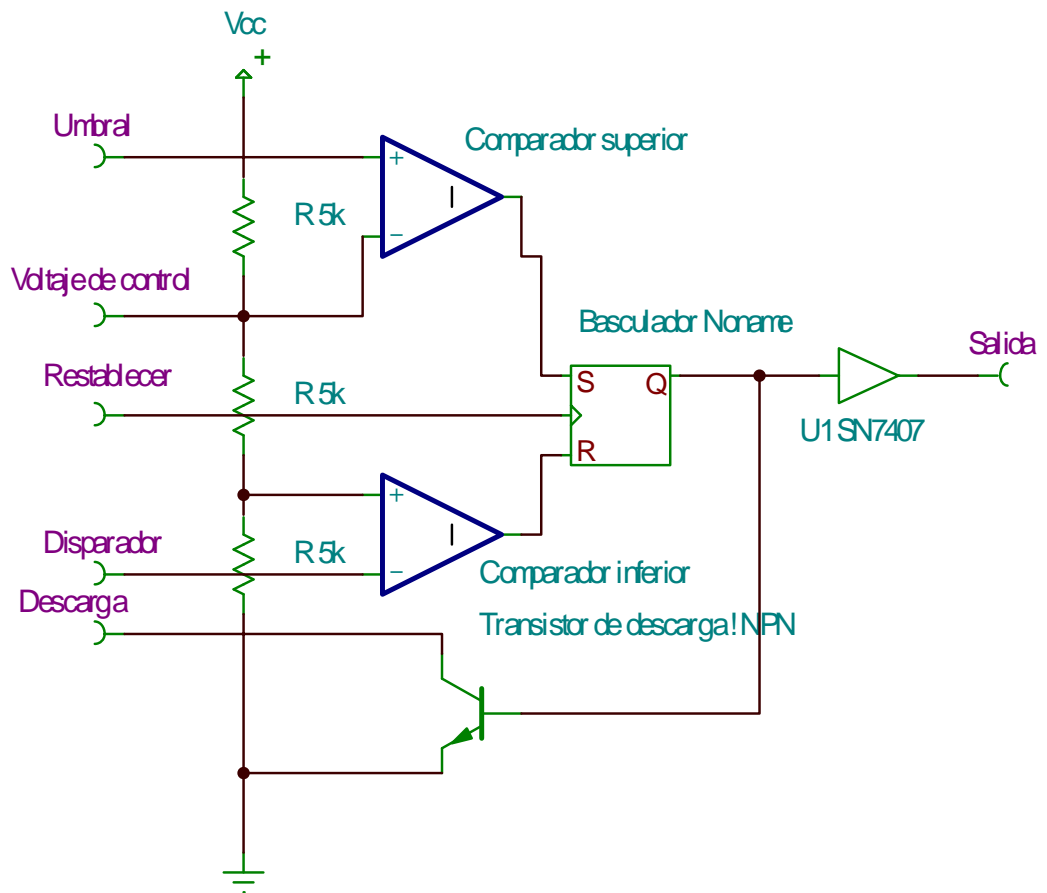
**Figura 4.3. Circuito hidráulico externo de refrigeración**

Las bombas que se utilizaron tienen impulsor de plástico para evitar el desprendimiento de partículas metálicas por parte del impulsor, asimismo se evita la contaminación ferrosa del agua, la cual advierte el fabricante tiene que ser evitado por las razones antes mencionadas.

El agua empleada para la refrigeración interna del dispositivo se ha decidido que sea agua destilada comprada a un laboratorio farmacéutico, este tipo de agua nos garantiza cumplir con las necesidades dieléctricas del aparato, al estar, en teoría, libre de iones provocados por las partículas en suspensión.

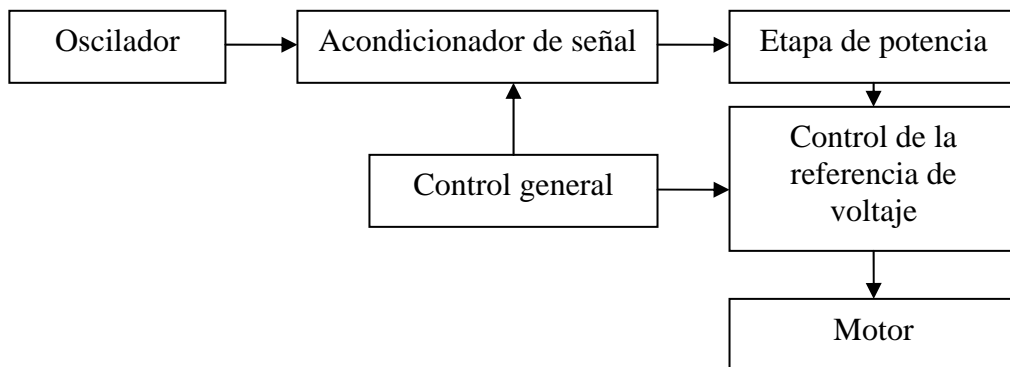
En cuanto al módulo de tiro para el método Czochralski, después de analizar sus circuitos internos se puede ver que es un circuito de control de motor de corriente continua por el método de troceo de la señal de entrada al motor.

Todo inicia haciendo oscilar un circuito temporizador del tipo 555, que internamente consta de dos comparadores, un circuito multivibrador biestable (flip-flop), un transistor de descarga y un divisor de voltaje resistivo. Como se ve en la figura 4.4.



**Figura 4.4 Diagrama eléctrico del circuito integrado 555**

Con base en este circuito se crea una señal cuadrada que puede variarse en cuanto a su ciclo de trabajo con gran precisión mediante un potenciómetro de varias vueltas, para después desmultiplicarse y estabilizarse mediante dispositivo de lógica digital. Para después introducirse esa señal en una etapa de potencia que alimentará el motor que comanda la rotación de la semilla y el hale de la misma. El diagrama de bloques es el se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5. Diagrama de bloques del módulo de control que controla el tiro del cristal.**

El modulo tiene en su carátula varios tipos de controles:

- El encendido que esta conectado al primario del transformador de la fuente para abrir el circuito y apagar el aparato.
- Los controles de dirección de tiro, estos manejan la dirección vertical en que se subirá o se bajará la semilla primero sola y después con el cristal. Estos controles modifican la referencia del voltaje
- El último control tiene el efecto de acelerar el ascenso y el descenso mediante la aceleración del motor, esta conectado a una resistencia conectada en paralelo con el potenciómetro para disminuir la impedancia lo que resulta en un aumento en la frecuencia a la que oscila el circuito integrado 555.

Para que el mismo motor pueda manejar rotación y tiro se tiene un sistema de engranes a modo de desmultiplicador de vueltas del motor para tener la torsión necesaria para girar el cristal. Esta rotación también se ocupara para hacer girar un tornillo conectado a la porta-semilla para hacerlo bajar y subir.

La metodología recomendada para la limpieza de los posibles residuos en el sistema de refrigeración del horno son: primero poner agua filtrada a circular dentro del sistema, después la conexión en sentido inverso del circuito de refrigeración con agua filtrada también con el fin de liberar partículas atoradas

en el sentido normal de la tubería. El agua que se utilice deberá tener disuelta alguna sustancia que limpie las tuberías del sistema, el fabricante recomienda jugos cítricos sin azúcares, los cuales no atacan los materiales de la tubería y disuelven partículas.

La manera de comprobar como se presenta la oscilación es conectar una antena a un osciloscopio y, con el horno encendido y sin carga, observar la forma de onda que debe ser senoidal, en caso de que la señal se presente cuadrada se sabrá que el trío está funcionando en saturación y si no se presenta, la retroalimentación es débil, ambas situaciones se resuelven mediante un tornillo externo donde se ajusta la retroalimentación.

## CONCLUSIONES

---

- Una de las conclusiones más importantes de esta tesis es observar que un sistema de calefacción basado en inducción es limpio en cuanto a emanaciones de partículas, lo que lo hace ideal para el crecimiento de cristales.
- El calentamiento inductivo es apropiado para materiales conductores porque induce una corriente eléctrica dentro de ellos lo que genera el calor.
- Un horno de radiofrecuencia de esta potencia se debe usar sólo cuando se cuente con las instalaciones apropiadas en cuanto a enfriamiento del agua utilizada para refrigeración, con una fuente de alimentación eléctrica que tenga la capacidad necesaria. Porque de otro modo su uso podría ser muy peligroso.
- El análisis del circuito de la fuente y del oscilador es muy importante para el mantenimiento y reparación del horno, por ser éste del año 1980, algunos de los dispositivos no se van a encontrar con el mismo nombre y marca, ya con el análisis se pueden buscar equivalencias que den buenos resultados.
- Otra de las cosas que concluí en este trabajo fue el valor que tienen los bulbos en el manejo de alta potencia, a veces se tiene a estos dispositivos por vetustos, caducos y obsoletos si se compara con un transistor, pero cuentan con algunas ventajas

que es bueno considerar para algunos diseños especiales. Un bulbo, como ya dije, tiene un buen manejo de altas potencias, además el ancho de banda de los bulbos es superior al de los transistores comunes y también existe gran variedad de bulbos que en una sola unidad resumen un gran número de dispositivos.

- Otra de las conclusiones es que este sistema gracias a que el calefactor no necesita estar en una cavidad aislada térmicamente tendrá menos componentes involucrados y se reducirá por este simple hecho su inercia térmica de control lo que será muy conveniente para cuidar que la estructura del cristal no sufra esfuerzos moleculares por variación incontrolada de temperatura, que por mínima que sea esta variación puede provocar dislocaciones que harían un sector policristalino en parte del cristal, y como el principio del crecimiento es una reacción en cadena, si hay un problema en una parte del cristal este problema se heredaría a otras partes del cristal como un efecto dominó, provocando que se arruine el cristal.



## RESULTADOS Y SUGERENCIAS

---

Entre los resultados de esta tesis están por supuesto haber entendido los circuitos principales que conforman el horno para entender en su totalidad el funcionamiento del horno lo cual permitirá a los usuarios del sistema ajustarlo y modificarlo en base al análisis hecho de los circuitos eléctricos, con la ventaja de que ya no se tendrá que iniciar desde el principio los análisis y se podrán aprovechar mejor todas las ventajas que posee.

Al ser un sistema que maneja tanta potencia esta tesis he puesto énfasis en el cuidado que debe tener el personal en todo momento para proteger el aparato y a las personas alrededor de este, y hacer énfasis en algunas observaciones que ha dado el fabricante.

También como resultado importante esta el hecho de que ahora el departamento podrá expandir la variedad de cristales que se podrán crecer porque con este horno podrán alcanzar mayores temperaturas lo que implica poder utilizar materiales con más alto punto de fusión.

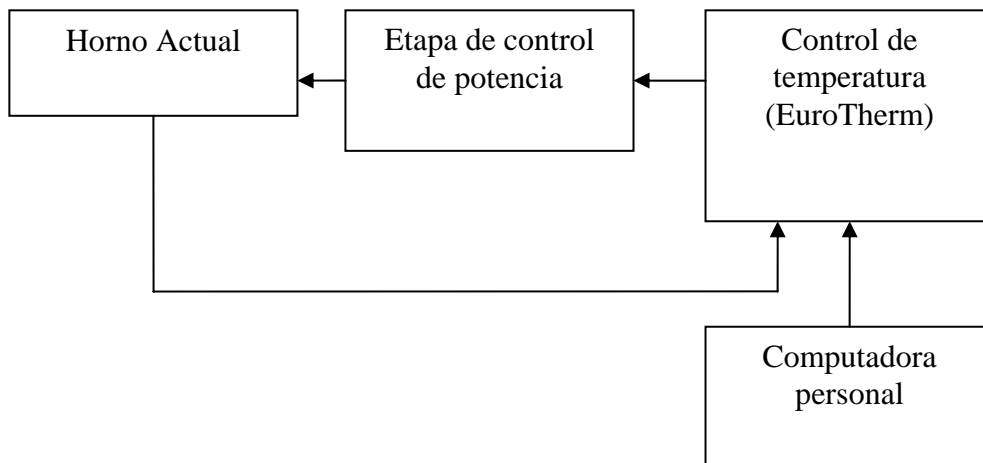
Como se mencionó a todo lo largo de la tesis uno de los resultados más que se esperaban de este horno es un sistema calefactor que eleve la temperatura lo suficiente sin contaminar los materiales a los que se le someta, al ser un sistema de pocos componentes y ninguno de estos propensos a desprender partículas se logró este objetivo. Ver figura R.3.

En cuanto a las sugerencias que he podido hacer sobre el aparato están el mejorar el uso de los puertos de interfaz electrónica con que ya cuenta de fábrica el sistema, los cuales están previstos para conectar un control externo con el cual se puede arrancar, detener súbitamente y variar la potencia del horno. Los primeros dos dispositivos son simplemente dos interruptores de modo pulsado, uno para el encendido y otro para el paro y el variador de potencia es un potenciómetro exactamente igual al que cuenta el aparato en el gabinete, mi propuesta es entonces aprovechar este puerto para poner otro sistema de interfaz que permita controlar el horno desde un sistema computacional tanto su encendido, apagado y la variación de su potencia. Algo parecido a lo que se hace actualmente con el horno de efecto joule que mediante un sistema de cómputo se puede controlar el sistema calefactor para controlar el diámetro de crecimiento, este programa y circuito ya están casi listos para usarse plenamente porque en estos momentos se encuentran en una fase experimental. El sistema actual tiene el diagrama de bloques mostrado en la figura R.1.

También será necesario que el programador haga algunas modificaciones al programa actual para que esté mejor adaptado a las necesidades del horno de inducción.

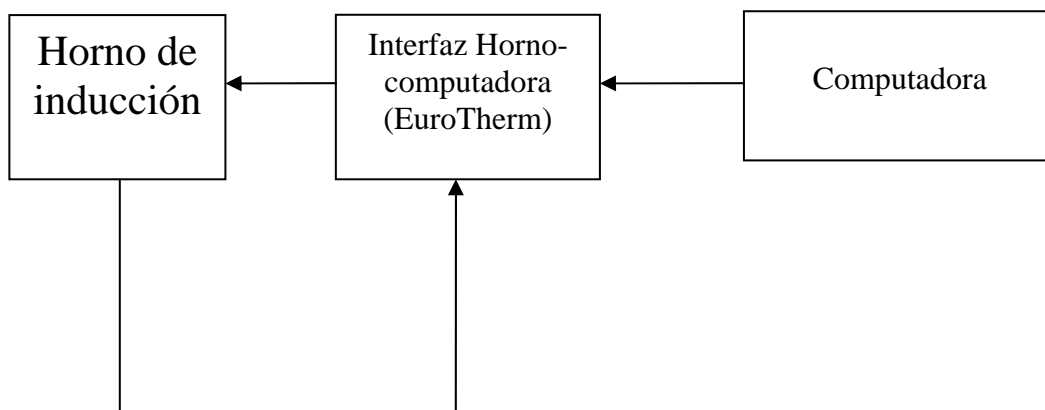
También entre mis propuestas esta el experimentar con diferentes formas para la bobina de trabajo para ajustar a las diferentes necesidades de temperatura que se pudieran necesitar, así como también se podría variar la frecuencia total del sistema con algunos cambios en los componentes electrónicos para hacer más versátil el sistema sin necesidad de adquirir otro horno que requeriría también una serie de adaptaciones extras. Ver figura R.4.

La interfaz Horno-computadora podría consistir en dos relevadores que emulen los pulsos de los botones de inicio y encendido del horno y otro circuito que emule al potenciómetro y que este calibrado junto con el dispositivo EuroTherm que ha demostrado ser un sistema confiable y versátil.



**Figura R.1 diagrama de bloques del sistema de control del horno de efecto Joule**

El sistema que propongo tendrá el siguiente diagrama de bloques



**Figura R.2 diagrama de bloques del sistema de control del horno de inducción**

También otra de mis propuestas es utilizar el mismo sistema de guías de onda que ocupan los otros hornos que están instalados en el instituto, para hacer más conveniente el uso del horno porque la bobina con que actualmente se cuenta es muy corta lo que implica que se van a hacer los crecimientos muy cerca del gabinete, esto no es práctico por que el gabinete es muy voluminoso

y el espacio destinado a este es reducido por lo tanto creo que será necesario considerar seriamente esta propuesta.



**Figura R.3 Vista de la bobina de trabajo**



**Figura R.4 Vista lateral de la bobina de trabajo.**

Otra de mis sugerencias es buscar la manera de mejorar la limpieza, todavía más, del ambiente en el que se encuentran los dos hornos, cada vez que se mejore la limpieza del ambiente aumentará significativamente la certeza de la

pureza de los cristales que se crezcan, entre las propuestas que tengo sería un sistema de filtración del aire que absorba todos los contaminantes ambientales que ingresan al cubículo donde se encuentra el horno, la utilización de ropa especial como sobretodos y guantes para cualquier procedimiento. Que se cubran toda la ropa, cabeza y piel para evitar que en el ambiente existan partículas de cabello, humedad, descamaciones, etcétera que desprende naturalmente el ser humano y por consiguiente el usuario, además de un sistema que absorba la humedad del aire que también puede contaminar el cristal, este sistema debe ser completamente limpio en cuanto a emisión de partículas. Además propongo utilizar métodos de control completamente externos para evitar el ingreso de personal que podría traer más contaminación, o también crear una metodología que logre que los operadores del sistema puedan entrar al cubículo causando las mínimas alteraciones al crecimiento de los cristales. Sugiero también mejorar el piso del cubículo poniéndole un tipo de piso que evite también contaminaciones.

## Bibliografía

---

1. Arguimbau, Lawrence  
Vacuum Tube Circuits  
John Wiley & Sons. 1964
2. *Electronic circuits and tubes*,  
autores: personal del laboratorio Cruft de la Universidad de Harvard  
Editorial: McGraw Hill.1967
3. Dorf, Richard C.  
Circuitos eléctricos,  
AlfaOmega.1995
4. Floyd, Thomas L  
Dispositivos electrónicos  
LIMUSA Noriega editores.2001
5. Dorantes Sierra, Jorge  
Diseño y construcción de un oscilador de R.F. para calentamiento inductivo  
Tesis profesional UNAM.1970
6. Curtis, Frank W.  
High frequency induction heating  
Editorial: McGraw Hill.1950
7. Enríquez Harper, Gilberto  
Elementos de diseño de subestaciones eléctricas  
LIMUSA Noriega Editores.2002
8. American Radio Relay League publication  
The radio amateur's handbook  
Arbó. 1964
9. American Radio Relay League publication  
The Radios amateur's Handbook  
American Radio Relay League Inc. 1979

10. Technical Data Stanelco HF Induction Heater
11. Riveros Rotgé, Héctor  
Crecimiento de cristales Artificiales y minerales  
UNAM. 1997
12. Riveros Rotgé, Héctor  
Introducción al crecimiento de cristales Artificiales y minerales  
UNAM. 2001

## APÉNDICE A

### “INTRODUCCIÓN A LOS CRISTALES”

---

Los cristales en ciencias se les llamarán únicamente a los materiales cuyas moléculas están acomodadas en estructuras geométricas muy bien definidas. Estas estructuras tienen una celda elemental o ladrillo de construcción que acomodados juntos reproducen el cristal macroscópico. Esta celda elemental es un paralelepípedo de caras paralelas el cual se localizan los átomos constituyentes. De modo que conociendo el acomodamiento microscópico de las moléculas de esta celda elemental se pueden calcular las propiedades macroscópicas del material. Un cristal ideal está formado por el acomodamiento de celdas elementales en las tres dimensiones, que si se acomodan sin errores de ningún tipo; llenan completamente el espacio ocupado. Los cristales reales tienen defectos que podemos clasificar como: puntuales, lineales, de superficie y de volumen. Se les llama defectos puntuales a la presencia de átomos intersticiales o cuando dentro de la estructura falta un átomo o dicho de otra manera hay presencia de una vacante. Los defectos lineales son dislocaciones que pueden ser de borde y de tornillo. Los defectos de superficie se presentan en la frontera entre dos cristales óptimos con orientaciones diferentes. Este último defecto se presenta en la mayoría de sólidos de la naturaleza donde existen pequeños cristales (granos) con distinta orientación, y por último las fallas de volumen que es cuando las regiones que forman el cristal, no se encuentran con el acomodo ideal constituyendo entonces una falla de apilamiento.



Por las razones arriba expuestas las demás que no cumplan estas características sustancias serán consideradas “no cristalinas o amorfas” cuando las moléculas se encuentran en desorden, como cuando se solidifica un líquido. Un caso es el vidrio el cual se puede considerar como un sólido amorfo o como un líquido sobreenfriado de alta viscosidad por lo tanto no vamos a ver fluir.

En el caso de los cristales líquidos que son sustancias muy usadas para los exhibidores y pantallas de los aparatos electrónicos, estas sustancias tienen la peculiaridad de formar estructuras ordenadas en ciertas direcciones pero otras en desorden. Eso significa que son sustancias que pueden tener comportamiento de sólido líquido al mismo tiempo. Estas sustancias tienen moléculas largas que son paralelas entre sí, al subir sus temperaturas estas pueden girar sobre su eje y sin dejar de estar paralelas. Para el eje en que giran están en desorden (como si fuera un líquido), pero mantienen fija su estructura como si fueran sólidos. Esto hace que puedan modificar la luz que incide sobre ellos es por eso que se usan para hacer las carátulas de los relojes y otros dispositivos **Liquid Crystal Display (pantallas de cristal líquido)**.

Otro caso de sustancias son los llamados cuasi-cristales que son sólidos con estructura de simetría pentagonal o heptagonal (7 lados), con las que no se puede conseguir estructuras que llenen todo el espacio. Aunque no son la fase más estable, se les puede obtener experimentalmente si el enfriamiento es lo suficientemente rápido para inhibir la formación de la fase cristalina, pero al mismo tiempo lento en comparación con la velocidad necesaria para obtener materiales sólidos amorfos.

La mayoría de los sólidos a nuestro alrededor son cristalinos, pero están formados por muchos cristalitas independientes, unidos entre sí por regiones que llamamos fronteras de grano. Para poder estudiar las propiedades de estos materiales conviene separar los efectos de las fronteras de grano de los del volumen del material. Para esto es necesario crecer cristales. Con el correcto crecimiento de los cristales se obtienen monocristales, estos últimos no tienen

fronteras de grano y se puede estudiar las propiedades de los cristales de una manera más precisa sin las ambigüedades que se tiene al estudiar policristales.

## APÉNDICE B

### “CRECIMIENTO DE CRISTALES POR EL MÉTODO CZOCHRALSKI”

---

El crecimiento de cristales es el primer paso en la determinación de la estructura cristalina de las sustancias, afortunadamente la tendencia a cristalizar es alta en muchas sustancias de interés aunque hay otras que presentan una alta dificultad en su obtención. A largo de la historia el crecimiento de cristales ha producido grandes cambios en nuestras vidas, empezando por las propiedades de los metales controladas por la estructura cristalina y el tamaño de grano que son materia de la metalurgia.

Las propiedades de los transistores fueron predichas teóricamente y su construcción práctica se realizó gracias a los trabajos de refinación zonal de Pfann quien obtuvo los primeros materiales semiconductores con la pureza necesaria.

Más recientemente las investigaciones de las propiedades estructurales del carbón han sido investigadas y ha resultado en la creación de nuevas estructuras como son los fullerenos.

La crisis energética y el calentamiento global han obligado a nuevas investigaciones sobre la obtención de energía a partir de radiación solar la cual se produce actualmente con cristales de silicio, he aquí entonces la importancia de crecer cristales.

El método que más se usa en el departamento de propiedades es el método Czochralski porque garantiza mejores cristales que otros métodos.

Método de Czochralski. El método consiste en fundir material en un crisol y bajar una semilla refrigerada y rotante, hasta hacer contacto con el líquido, la semilla se sube conforme el cristal se crece, manteniendo la interfase ligeramente arriba del nivel del líquido. La observación del aspecto de la interfaz, permite al operador inferir la calidad del cristal en crecimiento. Lo que normalmente se hace es mantener la semilla rotando a razón de 28 rpm para reducir los gradientes de temperatura en el líquido y lograr que el cristal obtenido crezca simétricamente. Este es el método más utilizado para crecer cristales de silicio, y funciona perfectamente cuando se quiere crecer cristales de Niobato de litio como es nuestro caso. Ver figura A2.1

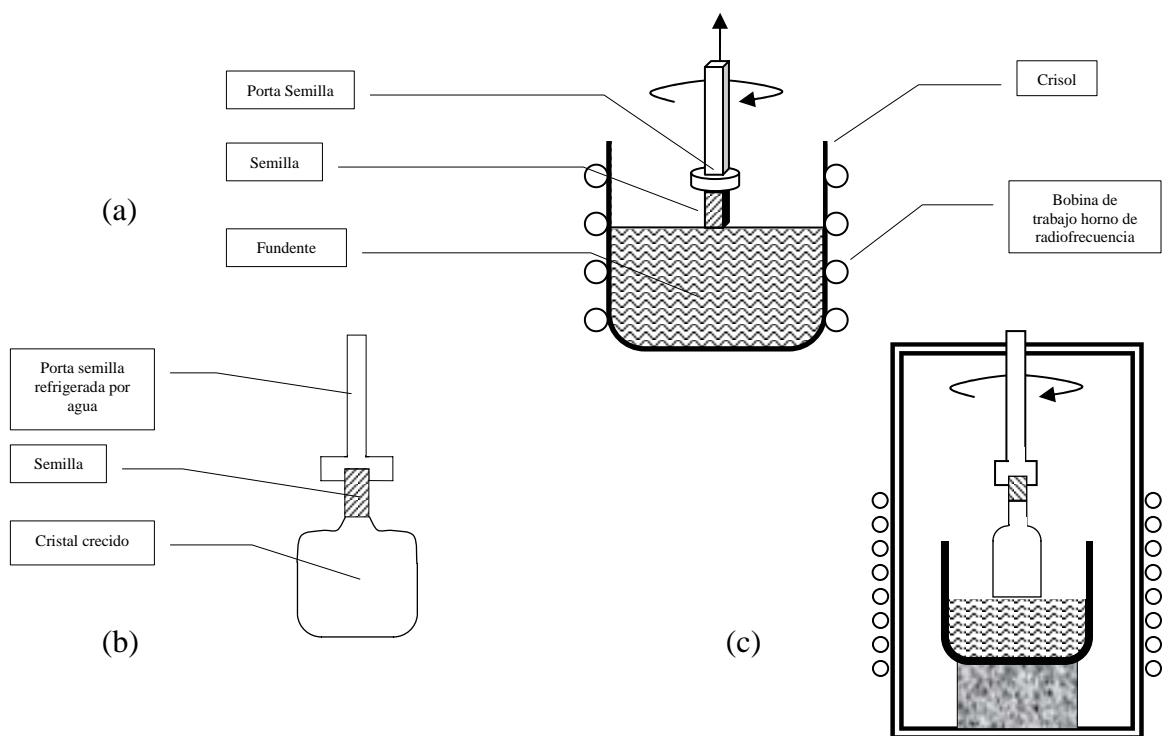


Figura A2.1. Ilustración del método Czochralski