

# Diseño y Construcción de un Inversor Monofásico de Alta Frecuencia basado en un Microcontrolador para el Sellado de Materiales Plásticos por Inducción Electromagnética

Víctor David Larco Torres<sup>(1)</sup>, Damián Alberto Larco Gómez<sup>(2)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación<sup>(1)(2)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)<sup>(1)(2)</sup>  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador<sup>(1)(2)</sup>  
vlarco@fiee.espol.edu.ec<sup>(1)</sup>, dlarco@fiee.espol.edu.ec<sup>(2)</sup>

## Resumen

*El presente proyecto tiene como finalidad el diseño y construcción de una máquina para sellar herméticamente envases plásticos mediante inducción electromagnética. Esta máquina generará un campo electromagnético de alta frecuencia en una bobina helicoidal montada en un molde aislante que será colocado sobre el envase a ser sellado. Se ha diseñado un inversor monofásico compuesto por un transistor de potencia IGBT, el cual conmutará a alta frecuencia para que en el circuito tanque conectado al mismo y del cual forma parte la bobina, circule una corriente sinusoidal, generando así el campo electromagnético.*

*El sistema electrónico de control de tiempos de sellado, número de muestras selladas y el control de fallas, está basado en un microcontrolador AT89C51 de la empresa ATMEL, este microcontrolador está basado en la arquitectura de la familia 8051, para el cual se ha desarrollado un algoritmo en assembler. También se manejará una memoria serial para el almacenamiento del tiempo de configuración y número de envases sellados, para que se pueda recuperar esta información aunque la máquina sea vuelta a encender.*

**Palabras claves:** envases plásticos, inducción electromagnética, campo electromagnético, inversor monofásico, IGBT, circuito tanque, microcontrolador, memoria serial.

## Abstract

*The objective of this project is to design and build a machine to seal hermetically plastic containers by electromagnetic induction. This machine will generate a high-frequency electromagnetic field in a helical coil mounted in a mold insulation which will be placed on the container to be sealed. It has designed a single-phase inverter consisting of a power transistor IGBT, which will commute to high frequency so that in the tank circuit connected to it and which is part of the coil, a sinusoidal current flow, thereby generating the electromagnetic field.*

*The electronic system for controlling the sealing times, number of sealed units and failures control, are based on the AT89C51 microcontroller of ATMEL, this microcontroller is based on the architecture of the family 8051, for which it has developed an algorithm in assembler. It also will handle a serial memory for storing the configuration time and the number of sealed containers, for retrieve this information, even if the machine is turned off.*

**Keywords:** plastic containers, electromagnetic induction, electromagnetic field, single-phase inverter, tank circuit, microcontroller, serial memory.

## 1. Introducción

El sellado por inducción es un proceso de calentamiento sin contacto que suelda una lámina de aluminio a la boca de un envase.

El proceso de sellado por inducción es el resultado de la conversión de energía inducida dentro del sello. De esta manera, transformando energía eléctrica a magnética, de magnética a eléctrica y finalmente de eléctrica a térmica, es que se completa el procedimiento y se logra el sellado.

La fuente de potencia de la selladora convierte la energía que provee la compañía proveedora de electricidad a una corriente alterna regulada de alta frecuencia. El cabezal de sellado transforma la energía eléctrica en un campo magnético. El sello de aluminio se expone a dicho campo magnético. La resistencia del disco de aluminio del sello interactúa con la energía eléctrica llamada también corriente circulante, la cual provoca el calentamiento del sello de aluminio.

El disco de aluminio deberá calentarse lo suficiente como para derretir la capa de polímero que se encuentra sobre el mismo. Una vez que se enfría el

polímero se adherirá tanto al sello como a la boca del envase, creando de esta manera un sello hermético [1].

## 2. Generador eléctrico para el sellado por inducción.

Básicamente, un generador para el calentamiento por inducción es un convertidor AC/AC cuya salida monofásica debe tener amplitud variable a una frecuencia relacionada con la frecuencia de resonancia del circuito resonante de carga. Este convertidor indirecto se compone de dos convertidores directos, el primero de ellos es un rectificador (convertidor AC/DC) y el segundo un inversor monofásico (convertidor DC/AC).

La mayoría de los sistemas de calentamiento por inducción usan un circuito eléctrico de salida llamado comúnmente "circuito tanque". Este circuito incluye un condensador y una bobina que constituyen un circuito resonante. Generalmente esta bobina es el inductor de calentamiento.

El término "tanque" proviene del hecho de que sus componentes, condensador y bobina, trabajan como almacén de energía reactiva, eléctrica en el caso del condensador y magnética en el caso de la bobina [2]

### 2.1. Elementos del generador.

Se compone fundamentalmente de lo siguiente:

- Un transformador de entrada destinado a adaptar la tensión de la red eléctrica a la salida.
- Un rectificador monofásico de onda completa.
- Un circuito de carga formado por el paralelo de la bobina de inducción y un condensador.
- Un transistor de conmutación.

La figura 2.1 muestra el circuito del generador para el sellado de inducción.

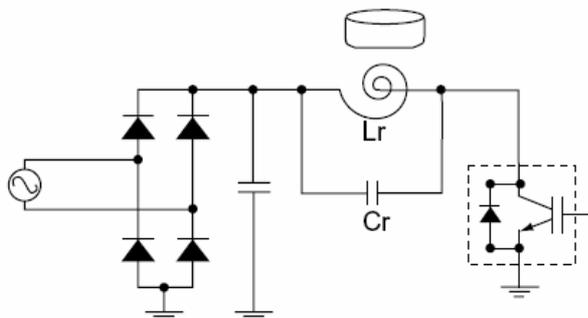


Figura 2.1 Generador para el sellado por inducción.

## 2.2. Cálculo de la potencia eléctrica del generador.

Básicamente, un generador para el calentamiento por inducción es un convertidor AC/AC cuya salida monofásica debe tener amplitud variable a una frecuencia relacionada con la frecuencia de resonancia del circuito resonante de carga. Este convertidor indirecto se compone de dos convertidores directos, el primero de ellos es un rectificador (convertidor AC/DC) y el segundo un inversor monofásico (convertidor DC/AC).

La capacidad del generador es determinada de acuerdo con la masa, temperatura de calentamiento y tiempo de calentamiento del material a calentar.

El cálculo de la potencia eléctrica del generador es como sigue.

$$P \text{ (Potencia Requerida)} = P1 + P2 + P3 + P4$$

P1 = Potencia absorbida por el material a calentar.

P2 = Pérdidas por radiación del calor.

P3 = Pérdidas por convección del calor.

P4 = Pérdidas por conducción del calor.

P1, P2, P3 y P4 son calculadas como sigue:

$$P1 = 4.186 \times M \times C \times \Delta T \text{ (kW/seg)} \quad (2.1)$$

Donde:

M=Masa del objeto a calentar en kilogramos.

C=Calor específico del material a calentar.

$\Delta T$ =Diferencial de temperatura en °C en la superficie del objeto a calentar.

$$P2 = 5.74e \times \left[ \left( \frac{273+t2}{1000} \right)^4 - \left( \frac{273+t1}{1000} \right)^4 \right] \text{ W/cm}^2 \quad (2.2)$$

Donde:

t1=Temperatura normal.

t2=Temperatura de calentamiento.

e=Tasa de radiación.

$$P3 = 159 \Delta T \text{ (uW/cm}^2\text{)} \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta T$ =Diferencial de temperatura en °C en la superficie del objeto a calentar.

$$P4 = 3.72 \Delta T \sqrt{\frac{KC\rho}{t}} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (2.4)$$

Donde:

K=Conductividad del calor del objeto a calentar.

C=Calor específico promedio del objeto a calentar.

$\rho$ =Densidad (g/cm<sup>3</sup>) del objeto a calentar.

t=Tiempo de calentamiento.

Para determinar la potencia eléctrica del generador se sigue la siguiente secuencia de cálculos:

- Cálculo de la masa del objeto a calentar.
- Cálculo de potencia absorbida por el material
- Multiplicar el coeficiente de pérdidas por calor
- Dividir para el tiempo de calentamiento.

**a: Masa del objeto a calentar.**

$$W = \pi \times r^2 \times h \times \rho \quad (2.5)$$

$$\Pi = 3.14$$

r = Radio del objeto a calentar.

h = Altura del objeto a calentar.

El objeto a calentar en el sellado de envases es una lámina de aluminio cuya densidad  $\rho$  es  $2.7 \text{ g/cm}^3$ .

Para el cálculo de la potencia del generador se ha considerado que la lámina de aluminio tenga un diámetro de 5 cm.

El ancho estándar de una lámina de aluminio para el sellado de envases es de 0.254 mm.

Ingresando los datos en la ecuación 2.5 se tiene que la masa de la lámina de aluminio es de:

$$M = 1.346 \text{ gramos}$$

**b: Potencia absorbida por el material.**

El valor del calor específico del aluminio es  $0.219 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}$ .

Normalmente la temperatura a la cual la lámina de aluminio es calentada para un óptimo sellado es de  $150^\circ\text{C}$ .

Usando la igualdad de que  $4.186 \text{ kW} = 1 \text{ Kcal/s}$  y sustituyendo los anteriores datos en la ecuación 2.1 se tiene que la potencia absorbida por el material a calentar, en este caso, la lámina de aluminio para el sellado de envases es de:

$$P_1 = 185.16 \text{ Watts/s}$$

**c: Pérdidas por calor.**

Calcular con precisión las pérdidas por calor tales como pérdidas por radiación, pérdidas por convección, pérdidas por conducción, pérdidas del circuito o las pérdidas por acoplamiento entre el inductor y el objeto a calentar representan dificultad, es por eso que para calcular la potencia total del generador se suele multiplicar por un factor de tres la potencia absorbida por el material a calentar.

Es así que la potencia total por segundo de salida del generador será:

$$P/s = 185.16 * 3 = 555.5 \text{ Watts/s}$$

**d: Tiempo de calentamiento.**

Considerando un tiempo de calentamiento de 1 segundo se tiene que la capacidad de potencia del generador eléctrico para el sellado por inducción será  $555.5 \text{ W/s}$  dividido para 1 segundo, es decir que el generador será de:

$$P = 555.5 \text{ Watts.}$$

**2.2. Diseño de los elementos de potencia del inversor resonante.**

Los elementos de potencia del inversor resonante son el inductor  $L_r$ , el capacitor  $C_r$ , que forman el circuito tanque, y el transistor de potencia mostrados en la figura 2.1

La profundidad en la cual se tiene un 87% de la potencia total disipada debida a un 63% de la densidad total de corriente, es llamada el estándar de profundidad de penetración ( $\delta$ ), y es calculada como sigue:

$$\delta = 5.03 \times \sqrt{\frac{\sigma}{\mu f}} \quad (\text{cm}) \quad (2.6)$$

Donde:  $\mu$ =Permeabilidad magnética del material a calentar.

$f$ = Frecuencia (Hz).

$\sigma$ =Resistencia específica del material a calentar ( $\mu \Omega * \text{cm}$ ).

La frecuencia de conmutación del transistor de potencia será calculada usando la ecuación 2.6 sabiendo que el material a ser calentado es el aluminio cuya permeabilidad magnética es igual a la unidad por ser un material no magnético, y que la resistencia específica del mismo es  $2.82 * 10^{-8} \mu \Omega * \text{cm}$ .

La lámina de aluminio tiene un espesor de 0.254mm, el cual representa la  $\delta$  en la que se tiene un 63% de densidad de corriente, pero para hacer el cálculo de la frecuencia de conmutación del transistor, se usará una  $\delta$  en la que se tenga el 100% de densidad de corriente, que por regla de tres sería una  $\delta$  igual a 0.4031 mm.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 2.6 y resolviendo para  $f$ , se tiene que la frecuencia de conmutación del transistor de potencia es:

$$f = 43900 \text{ Hz.}$$

El circuito tanque es el encargado de generar el campo electromagnético en la bobina para que a su vez, esta induzca corrientes de eddy en la lámina de aluminio para el sellado del envase, este circuito consta de una inductancia  $L_r$  en paralelo con una capacitancia  $C_r$ , que conectados juntos, causa que una

corriente eléctrica puede alternar entre ellos a una frecuencia angular de:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LrCr}} \quad (2.7)$$

Para obtener un correcto sellado de la lámina al envase, el campo magnético generado en la bobina del circuito tanque debe ser alterno y lo más uniforme posible, por lo que se necesita que una corriente sinusoidal fluya a través de  $L_r$ . Una corriente sinusoidal uniforme puede ser obtenida mediante el efecto de resonancia.

El efecto de resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales, la frecuencia a la que se da esta igualdad es llamada frecuencia de resonancia y es demostrada como sigue:

$$X_{L_r} = X_{C_r} \quad (2.8)$$

$$\omega L_r = \frac{1}{\omega C_r} \quad (2.9)$$

Convirtiendo la frecuencia angular a hertz, se tiene:

$$2\pi f L_r = \frac{1}{2\pi f C_r} \quad (2.10)$$

Despejando la frecuencia de resonancia, se tiene:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (2.11)$$

Un circuito LC por si solo no entra en resonancia, por lo que necesita ser alimentado por una fuente AC, esto lo hace el transistor de potencia desde un voltaje DC, el transistor tiene que conmutar a la frecuencia calculada en el subcapítulo 2.4.1 y esta será utilizada en la ecuación 2.11 para encontrar los valores adecuados de  $L_r$  y  $C_r$ .

Sabiendo que la potencia de la fuente es de 555.5 Watts y que la tensión de la misma, suministrada por la red eléctrica es 110 Voltios RMS, se puede obtener la corriente RMS suministrada por la fuente como sigue:

$$I_{RMS} = \frac{P_{fuente}}{V_{fuente}} \quad (2.12)$$

Entonces la corriente suministrada por la fuente AC será:

$$I_{RMS} = 5.05 \text{ Amp}$$

La capacitancia  $C_r$  es calculada con la ecuación:

$$V_{RMS} = I_{RMS} \times X_C = I_{RMS} \times \frac{1}{2\pi f C_r} \quad (2.13)$$

Despejando  $C_r$  y reemplazando los valores anteriores se tiene que:

$$C_r = 166.6 \text{ nf.}$$

La inductancia  $L_r$  es calculada despejando  $L_r$  de la ecuación 2.11 y evaluando los valores anteriores, teniendo así que:

$$L_r = 78.97 \text{ uH.}$$

### 3. Diseño de la tarjeta electrónica que controla el inversor de la máquina de sellado por inducción.

El transistor de potencia a ser utilizado es un IGBT con las especificaciones de corriente, frecuencia y voltaje calculados en la sección 2, el circuito integrado que controla la frecuencia de conmutación del IGBT será un TL494, el cual es un circuito de control de ancho de pulso modulado.

La salida del TL494 es una onda cuadrada de 0 voltios a 15 voltios en el pin 8 y 11, cuya frecuencia se ajusta variando los valores de  $C_T$  y  $R_T$  conectados en los pines 5 y 6 respectivamente, estos pines están conectados a un oscilador interno el cual genera una onda diente de sierra, la frecuencia es calculada con la siguiente ecuación:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (3.1)$$

El TL494 permite dos configuraciones de operación, la primera es llamada "Single ended PWM" que consiste en usar los dos transistores de salida del circuito integrado conectados entre si para que la frecuencia de salida sea igual a la calculada en la ecuación 3.1, para activarla se conecta el pin 13 a 0 voltios, la segunda configuración es llamada "Push pull" en la que cada transistor es manejado individualmente, esta configuración permite dividir la frecuencia de salida calculada en la ecuación 3.1 a la mitad, para activarla, se conecta el pin 13 al voltaje de referencia del pin 14, el cual es de 5 voltios.

Se ha elegido la operación "Push pull" porque el inversor consiste de un solo transistor de potencia, por lo que solo se necesitará una de las salidas del integrado para controlar al IGBT.

En la sección se calculó que la frecuencia de conmutación del IGBT debe ser 43900 Hz, asumiendo un valor de  $C_T = 1\text{nF}$ , teniendo en cuenta la operación

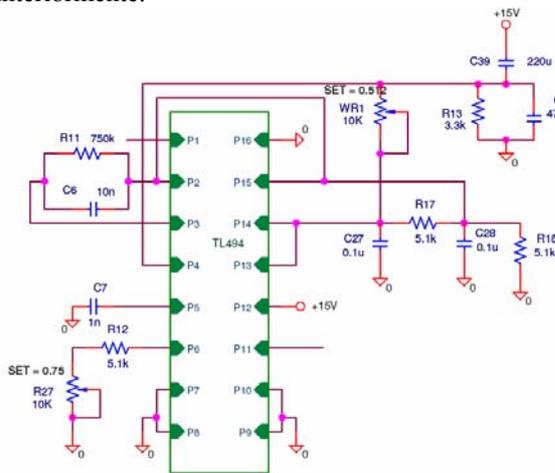
elegida para el TL494 y reemplazando los anteriores valores en la ecuación 3.1 se tiene que  $R_T = 12.5 \text{ K}\Omega$ .

Otro parámetro a configurar es el tiempo en el que el IGBT va a estar en el estado de conducción. Debido a que en la bobina de inducción que conforma el circuito tanque, el voltaje adelanta a la corriente en 90 grados o  $T/4$ , es importante configurar adecuadamente este parámetro para que la corriente que circula en la bobina sea lo más sinusoidal posible y a su vez el campo magnético generado en ella sea uniforme. El control de este parámetro se lo realiza a través del pin 4 del integrado, variando el voltaje que este recibe a través de un potenciómetro conectado al mismo.

La habilitación del integrado se hará a través del pin1 al recibir +5 voltios, y se lo deshabilitará al recibir 0 voltios en el mismo, debido a que el TL494 es el único integrado que controlará directamente el funcionamiento del IGBT se lo ha configurado así para detener el proceso de sellado en caso de que los circuitos de protección de la máquina de inducción sean activados por sobrecorriente, sobrevoltaje o bajo voltaje en la fuente de alimentación.

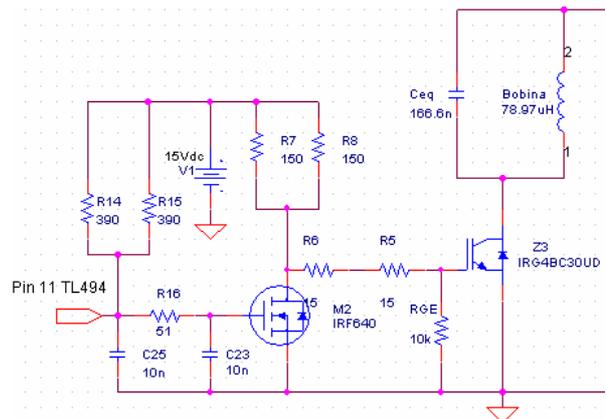
Como se dijo anteriormente solo una de las dos salidas del integrado será utilizado, se ha elegido usar el pin 11.

A continuación se presenta el diagrama esquemático de la configuración del TL494 descrita anteriormente.



**Figura 3.1** Configuración del TL494.

El circuito controlador de puerta del IGBT se muestra en la figura 3.2. El IGBT es manejado indirectamente por el TL494 a través de un transistor MOSFET debido a que la señal de disparo que se obtiene del TL494 es lo contrario de la que el IGBT necesita.



**Figura 3.2** Controlador de Puerta del IGBT.

La configuración de este circuito está basada en la hoja de datos de los transistores para la protección y correcto funcionamiento de los mismos.

La función del MOSFET es enviar al IGBT el complemento de la señal del pin 11 del TL494 ya que el IGBT necesita una gran cantidad de corriente para encenderse, la cual, no puede ser suministrada por el TL494 pero sí la puede suministrar el MOSFET.

La resistencia de la compuerta del MOSFET,  $R_G = R16$ , para el encendido del mismo en un tiempo determinado es calculada usando los parámetros de su respectiva hoja de datos y es como sigue:

$$R_{G_{MOSFET}} = \frac{V_{GS(th)}}{Q_G} \times t_{ON} \quad (3.2)$$

Donde:

$Q_G$ =Carga total de la compuerta del MOSFET la cual es igual a 58nC.

$V_{GS(th)}$ =Voltaje de umbral en cual el MOSFET conmuta que es igual a 4 Voltios.

$t_{ON}$ =tiempo de encendido del MOSFET.

Se ha establecido un tiempo de encendido entre 0.5us y 1us, es decir un tiempo de encendido promedio de 0.750us.

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación 3.2 se tiene que el valor de  $R_G$  para el MOSFET debe ser aproximadamente igual a 51.7 ohmios.

Cuando el MOSFET no conduzca, el IGBT sí lo hará, esto será a través de sus resistencias de compuerta conformada por R5 y R6

La resistencia de la compuerta del IGBT,  $R_G = R5 + R6$ , para el encendido del mismo en un tiempo determinado es calculada usando los parámetros de su respectiva hoja de datos y es como sigue:

$$R_{G_{IGBT}} = \frac{V_{GS(th)}}{Q_G} \times t_{ON} \quad (3.3)$$

Donde:

$Q_G$ =Carga total de la compuerta del IGBT la cual es igual a 75nC.

$V_{GS(th)}$ =Voltaje de umbral en cual el MOSFET conmuta que es igual a 6 Voltios.

$t_{ON}$ =tiempo de encendido del MOSFET.

Se ha establecido un tiempo de encendido entre 0.5us y 0.25us, es decir un tiempo de encendido promedio de 0.375us.

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación 3.3 se tiene que el valor de  $R_G$  para el IGBT debe ser aproximadamente igual a 30 ohmios.

Si el circuito manejador de compuerta del IGBT sufre algún daño o no se encuentra operando, es decir, cuando la compuerta se encuentra en estado abierto, y si se aplica un voltaje en el circuito de potencia, el IGBT puede ser destruido, para prevenir esta destrucción es recomendable situar una resistencia de 10 kilo ohmios  $R_{GE}$  entre la compuerta y el emisor del mismo.

#### 4. Diseño de la tarjeta electrónica de control general.

La tarjeta de control general es la encargada de administrar las señales y el funcionamiento de la Máquina de Sellado a través del microcontrolador AT8051 de la compañía ATMEL.

#### 5. Consideraciones para la programación del microcontrolador.

Se han definido las condiciones que se tendrá que programar en el microcontrolador para que éste realice el monitoreo de las señales de los circuitos de protección, y muestre los mensajes de error para cada caso así como el encendido de los leds que indicarán el estado en que la máquina se encuentra.

#### 6. Algoritmo de control programado en el microcontrolador.

El programa ha sido escrito en assembler que es el lenguaje de máquina del microcontrolador AT89C51 de la familia 8051, este microcontrolador es producido por la empresa ATMEL, el algoritmo programado se ha compilado y depurado usando el software uVision de la empresa KEIL.

La figura 6.2 muestra el diagrama de flujo general de la operación de la máquina de sellado desde el momento en que se enciende la misma. El estado llamado "Máquina Lista" se refiere a que en este estado la máquina se encuentra mostrando la cantidad de envases y tiempo configurado en los displays, monitoreando los circuitos de protección y esperando a que una de las botoneras sea presionada. La botonera START es la más importante ya que al ser presionada

se realiza el sellado del envase, pero al mismo tiempo mientras dure el sellado, los circuitos de protección estarán siendo supervisados en todo momento. Luego del sellado, la memoria escrita con la cantidad de envases actualizado.

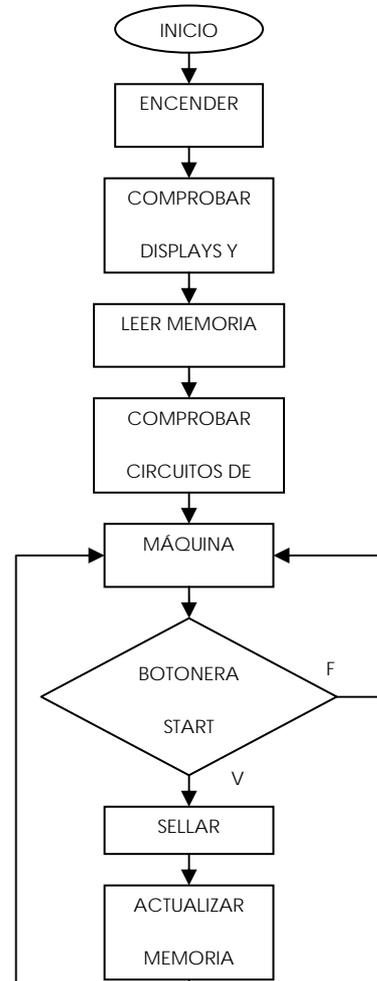


Figura 6.2 Diagrama de Flujo General de la Máquina de Sellado.

#### 7. Conclusiones

El calentamiento por inducción es una combinación de la inducción electromagnética, el efecto piel, y el principio de la transferencia de calor, el calentamiento por inducción se refiere a la generación de energía calórica por la corriente y la corriente de eddy creada en la superficie de un objeto cuando este es situado en el campo magnético formado alrededor de una bobina, donde la corriente alterna fluye a través de esta.

#### 8. Bibliografía

- [1] E.J. Davies, P. Simpson, "Induction Heating Handbook", McGraw – Hill, 1999
- [2] E.J. Davies, "Conduction and Induction Heating", IEE Power Engineering (1990).