

# **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA UN HORNO INDUSTRIAL**

**WILLIAM HERNÁNDEZ AGUDELO**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS ELECTRICA, ELECTRÓNICA, FISICA Y  
SISTEMAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2007**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO DE  
CONTROL DE TEMPERATURA PARA UN HORNO INDUSTRIAL**

**WILLIAM HERNÁNDEZ AGUDELO**

Tesis para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Asesor:

Tomas Delgado Paredes  
Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y  
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN  
PEREIRA  
2007

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Pereira, \_\_\_\_ \_\_\_\_ \_\_\_\_

## **DEDICATORIA**

**Dedicado a la memoria de mis padres.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Agradezco a mi asesor de tesis Ingeniero Tomas Delgado Paredes por su valiosa colaboración.**



## GLOSARIO

**ADAPTADOR:** son tarjetas de circuitos impresos que se incorporan a la unidad central de procesamiento para controlar un determinado dispositivo.

**ALGORITMO:** secuencia de pasos que conforman una tarea específica, usualmente en el ámbito computacional.

**AUTOMATIZACIÓN:** aplicación de procedimientos automáticos a un aparato, proceso o sistema.

**BUFFER:** memoria dedicada a almacenar temporalmente la información que debe procesar un dispositivo hardware para que éste pueda hacerlo sin bajar el rendimiento de la transferencia.

**CIRCUITO INTEGRADO:** es una pastilla o chip muy delgado en el que se encuentran miles o millones de dispositivos electrónicos.

**CONTROLADOR P:** dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional.

**CONTROLADOR PI:** dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional – integral.

**CONTROLADOR PID:** dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional – integral – derivativo.

**DRIVER:** pequeño programa cuya función es controlar el funcionamiento de un dispositivo del ordenador bajo un determinado sistema operativo.

**EXTRACTOR:** dispositivo terminal de aire que se instala encima de un conducto de extracción de ventilación natural, con ayuda del cual, creando una presión negativa y dependiendo de la velocidad del viento, se puede evitar el rebufo y aumentar el caudal. Puede incluir o no partes móviles.

**HARDWARE:** componentes físicos de un ordenador o de una red, en contraposición con los programas o elementos lógicos que los hacen funcionar.

**HEXADECIMAL:** se refiere al sistema numérico en base 16, que consiste de 16 símbolos: los números del 0 al 9 y letras, de la A a la F.

**HORNEO:** del verbo hornear, meter una cosa en el horno para asarla o cocerla.

**INTERFASE:** es el dispositivo hardware o protocolo de programación encargado de realizar la adaptación que haga posible la conexión entre dos

sistemas o elementos de la unidad central de procesamiento, entre unidades o con el usuario.

LED: diodo emisor de luz (Light Emitting Diode).

MIMO: Múltiple Input - Múltiple Output.

PIA's: tarjeta Peripheral Interfase Adapter.

REACTORES: Se refiere a reactancias o auto transformadores en serie con la carga, en los cuales se puede saturar el núcleo con un sistema electrónico.

SIMULACIÓN: es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo.

SISO: Single Input – Single Output.

SISTEMA DE CONTROL: es un conjunto de dispositivos de control de entrada lógicos y de salida que sirven para controlar procesos.

SWITCH: conmutador o interruptor de un aparato eléctrico.

TIRATRONES DE MERCURIO: tubos al vacío con vapor de mercurio.

TIRISTOR: es un componente electrónico semiconductor que utiliza realimentación interna para producir una conmutación y que se emplea generalmente para el control de potencia.

TRANSISTOR: es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador.

TRIAC: es un dispositivo semiconductor, de la familia de los transistores.

VIA's: tarjeta Versatile Interfase Adapter.

ZONA: cualquier parte de terreno o superficie encuadrada entre ciertos límites.

## RESUMEN

Una breve descripción del problema encontrado en la planta de una empresa pujante de la región, donde funciona un horno de tipo industrial, utilizado para el horneado de galletas es el siguiente:

Es un horno de tipo túnel con calefacción por electricidad con una potencia instalada de 600 Kwh., una capacidad de producción de 500 Kg. /h y una extensión de 50 metros, el cual es cruzado por una malla metálica continua a lo largo del mismo, esta gira sobre dos rodillos ubicados en los extremos del horno, al que se le suministra calor tanto por la parte superior como inferior de la malla.

El horno esta dividido en seis zonas de calentamiento, las cuales están diseñadas para funcionar con resistencias, alimentadas con una tensión máxima de 440 voltios, 60 Hz, tres (3) fases conectadas en Delta y controladas por medio de reactores en cada una de las zonas y gobernados por un circuito electrónico diseñado con tubos electrónicos al vacío y tiratrones de mercurio (tubos al vacío con vapor de mercurio), implementado así el control de temperatura para el horno.

El producto se deposita en los moldes al inicio del horno en la parte superior de la malla, el cual viaja a través de toda la extensión de esta a una velocidad constante para su horneado, obteniéndose al final el producto horneado con las especificaciones requeridas según las condiciones y estados controlados.

La construcción del horno que se relaciona en este documento data de los años 50's y con el transcurrir del tiempo se han ido degradando los elementos de control del equipo en mención, convirtiéndose en obsoletos y sin control alguno.

La operación del horno se transformo en un proceso manual, hasta el punto de demandar un grupo determinado de operarios que de una manera muy dispendiosa e imprecisa trataban de controlar la temperatura del equipo. Esta operación consistía en encender y apagar interruptores ubicados en cajas externas a lo largo del horno, los que conectaban las resistencias de la parte superior o inferior para poder obtener así mayor o menor grado de calor en las respectivas zonas de calentamiento.

El operador se desplazaba a todo lo largo del horno para hacer esta operación y analizar las variaciones del producto a la salida, luego esperar para determinar de una manera apreciativa donde debería realizar correcciones de la temperatura y regresar a operar los switches de las resistencias.

Por lo anteriormente descrito no se garantizaba un producto final de óptima calidad y estándares apropiados ya que características tales como la variación del color y la humedad que presentaba la galleta al final del proceso, afectaba considerablemente el rendimiento y productividad de la línea.

## **DESCRIPCION DEL SISTEMA**

Es un horno de tipo túnel horizontal con calefacción por electricidad con una potencia de 600 Kwh. aprox. 2050000 BTU/h, una capacidad de producción de 500 Kg. /h, en una extensión de 50 metros por un ancho de 1,20 metros y una altura de 1,70 metros.

Construido en forma de un túnel con lamina metálica, cuyas paredes se encuentran recubiertas con aislamiento de lana mineral, el cual es atravesado a lo largo por una malla metálica continua que gira sobre dos rodillos ubicados en los extremos del horno e impulsado por un motor-reductor, a la que se le suministra calor por la parte alta y baja del lado superior de la malla por medio de resistencias eléctricas.

Este horno esta dividido en seis zonas de calentamiento, las cuales están diseñadas para operar con resistencias eléctricas, que pasan de lado a lado en

forma paralela sobre toda la extensión del horno, están alimentadas con una tensión de 440 voltios, 60 Hertz, tres fases, en conexión Delta y controladas por medio de reactores en cada una de las zonas, estos son gobernados por un circuito electrónico diseñado con tubos electrónicos al vacío y tiratrones de mercurio (tubos al vacío con vapor de mercurio), implementado así el control de temperatura para el horno.

A continuación se muestra el horno en mención (Figura 1)

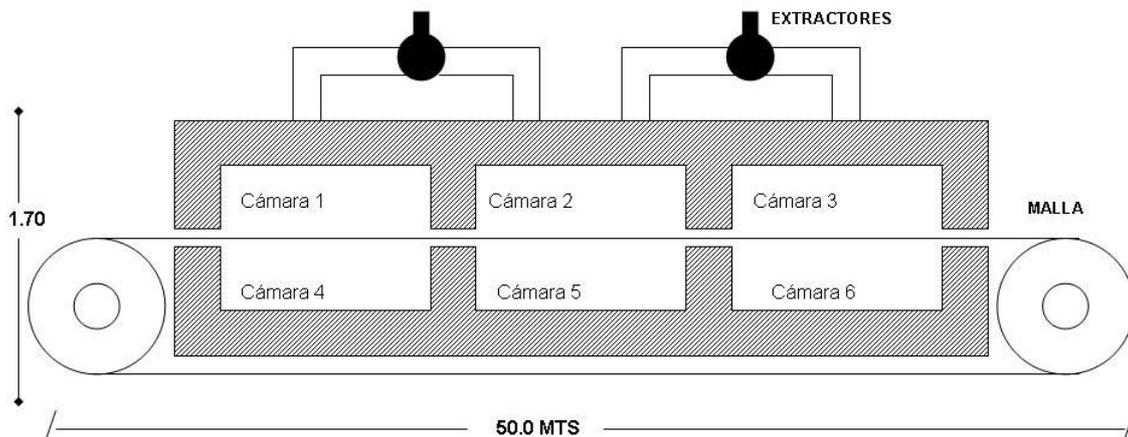
**Figura 1. Horno a controlar**



En la figura se pueden apreciar las cajas eléctricas externas de las diferentes zonas de calentamiento que alimentan las resistencias eléctricas, los extractores de gases en la parte superior del horno que son impulsados por motores de corriente alterna, los tambores o cilindros finales por donde rueda la malla metálica donde se deposita el producto y los transportadores finales que reciben el producto para llevarlo a las maquinas de embalaje.

En la figura 2 se puede apreciar un corte de la estructura del horno en la cual se ven las distintas cámaras correspondientes a las diferentes zonas de horneado, como lo son las paredes de aislamiento.

**Figura 2. Corte esquemático del Horno**



## DESCRIPCION DEL PROCESO

En el proceso del **HORNEO** es muy importante mantener constante un nivel de temperatura predeterminado (set - point) en cada una de las zonas del horno, pues cada una de estas cumple una función específica.

A continuación se describe de forma abreviada cada una de las zonas antes mencionadas:

- **Zona I:** es la parte inicial del horno donde se logra un calentamiento y desarrollo del producto.
- **Zona II:** es la parte intermedia del horno donde se obtiene la estabilización del producto.
- **Zona III:** es la parte final del horno donde se alcanza la coloración y secado del producto.

La necesidad de obtener un producto con unos estándares de calidad superiores era eminente imperioso, la forma de lograr este proceso se obtiene implementando un **Sistema de Control Automático**, en el que se puedan fijar perfiles de temperatura mas estables e independientes en cada una de las zonas de calentamiento.

El proyecto pretende entonces presentar el diseño e implementación del montaje de un **SISTEMA AUTOMATICO DE CONTROL DE TEMPERATURA para un Horno Industrial tipo eléctrico para el horneado de galletas.**

El diseño cubrirá todo el sistema de control y también se tendrá la opción de futuras expansiones en las diferentes zonas del horno.

Para lograr este objetivo se utilizara el **MICROCOMPUTADOR** como herramienta moderna en el control industrial de procesos de fabricación con técnica de **Programa Almacenado.**

## INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales es necesario ejercer control sobre las diferentes variables de la producción para satisfacer las exigencias de los consumidores y asegurar óptimas condiciones de calidad durante y después de la fabricación.

La reducción de variaciones que afectan la calidad del producto o la productividad como también el tiempo con que se ejecuta, son uno de los objetivos principales de los procesos industriales; esto se logra gracias a la **AUTOMATIZACIÓN** que nos brinda precisión, velocidad y confiabilidad.

El proyecto presenta el diseño, construcción y montaje de un control automático de perfiles de temperatura en un horno eléctrico que se utiliza en la industria de productos alimenticios.

El horno consta de seis zonas con una potencia instalada de 600 Kilovatios, alimentado por una tensión de 440 voltios, 60 Hertz, tres fases en conexión Delta.

Utilizando el MICROCOMPUTADOR y técnicas de Programa Almacenado se mantendrá en cada una de las zonas de calentamiento una temperatura seleccionada (set - point) constante e independiente del nivel de disturbios externos como pueden ser:

- Cambios o variaciones en la red eléctrica
- Grado de humedad en la preparación de las masas
- Apertura de los extractores de gases
- Alteración del calor por daños en las resistencias
- Cambio de velocidad de la malla transportadora del producto.

Las ventajas que aporta esta nueva tecnología son:

- Reducción del consumo de energía eléctrica
- Centralización del control
- Reducción de costos
- Precisión de las medidas de temperatura
- Un sistema mas flexible y expandible
- Buena confiabilidad
- Sistema exento de ruidos externos
- Temperaturas estables
- Calidad
- Rendimiento

Como el sistema fue construido en los 50's, tratar de identificar el control del modelo dinámico resultaría un proceso inexacto, dispendioso por su construcción propia, además costoso ya que la implementación del proyecto debería hacerse dentro de los límites de tiempo sugeridos por fabricación (mantenimiento de fin de año); dichas razones precisaron considerar el proceso como un **SISTEMA DE DINAMICA DESCONOCIDA**.

En los procesos industriales este tipo de situación es muy frecuente.

Los sistemas desconocidos a controlar del tipo SISO (Single Input - Single Output), una entrada - una salida han utilizado de una manera muy efectiva controladores **P**, **PI**, **PID** (proporcionales, proporcionales-integrales y proporcionales-integrales-derivativos) y controladores de sintonización o calibración ON-LINE desarrollados por ZIEGLER-NICHOLS [1], [2].

Si los sistemas a controlar son MIMO (Múltiple input - Múltiple output), múltiples entradas - múltiples salidas como es nuestro problema; es posible utilizar los métodos SISO de una manera empírica, despreciando los errores generados por los acoples existentes entre las diferentes entradas y salidas del sistema.

El utilizar esta estrategia de control asume implícitamente una solución al problema de control, si la solución existe mediante calibración iterativa ON-LINE podemos entonces llegar a un ajuste “óptimo” de los parámetros de los controladores. Pero si el acople entre las entradas y salidas de dicho sistema es considerable no es posible utilizar con éxito los métodos SISO de calibración.

Surge la necesidad entonces de utilizar algún método para estudiar previamente la existencia de una solución.

La interacción de temperaturas entre las diferentes zonas del horno puede ser no despreciable, por lo que se considero la conveniencia de efectuar un estudio sobre la existencia de una solución al sistema para desarrollar el control que se debería implementar.

Como se puede apreciar la característica del sistema a controlar es “desconocido”, no es posible utilizar métodos desarrollados por la teoría de control moderno que se originan del modelo matemático del sistema.

Se decidió utilizar uno de los métodos existentes, el **Método de Sintonía y Calibración para Sistema Multivariable** [3].

Dicho método consiste en utilizar los resultados de una serie de experimentos OFF-LINE sobre la planta en lazo-abierto. Partiendo de los resultados obtenidos se consigue la condición necesaria y suficiente para la existencia de la solución al sistema de control.

Da lugar a que se consiga la estructura del control que se ha de implementar. Obtenido el sistema, se efectúa una calibración ON-LINE en lazo-cerrado para complementar el ajuste “óptimo” del sistema.

El diseño se hace aplicando tecnología moderna de estado sólido tanto en el sistema de control como en las etapas de salida de potencia a las resistencias.

El MICROCOMPUTADOR se encargara de controlar la temperatura en cada una de las zonas del horno y del estado de los motores de la línea.

La utilización hoy en día de los Microprocesadores tiene una notable repercusión en los diseños electrónicos, en el tiempo de proceso y en los costos de fabricación tanto a nivel industrial como a nivel de elaboración y consumo por su buena relación calidad – precio.

# 1. TEORIA

## 1.1 PROCEDIMIENTO DE SINTONIA

La descripción del procedimiento de sintonía, que es usado para determinar la existencia de una solución en un control realimentado de un sistema Multivariable desconocido MIMO es ampliamente descrito por su autor [3].

Suposiciones de la planta a la cual se le implementara el sistema de control:

1. Se asume que la planta a ser controlada es asintóticamente estable en lazo-abierto.
2. Se asume que la planta puede ser descrita por el siguiente modelo lineal Multivariable e invariante con el tiempo.

Por lo tanto,

$$\begin{aligned}x &= Ax + Bu + Ew \\y &= Cx + Du + Fw \\e &= \gamma - \gamma_{ref}\end{aligned}\tag{1}$$

donde:

$x$	$\varepsilon$	$R^n$	son los estados
$u$	$\varepsilon$	$R^m$	son las entradas
$\gamma$	$\varepsilon$	$R^r$	son las salidas a regular
$w$	$\varepsilon$	$R^\Omega$	son los disturbios constantes
$\gamma_{ref}$	$\varepsilon$	$R^r$	son las constantes del sistema "set.point"
$e$	$\varepsilon$	$R^r$	son los errores del sistema

### 1.1.1 Introducción

La matriz función de transferencia de (1) se define por  $G(s)$  donde:

$$G(s) \stackrel{\Delta}{=} D + C (sI - A)^{-1} B$$

Y la matriz de ganancia en estado estable se define como:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S} &= G(0) \\ G(0) &= D - CA^{-1} B \end{aligned}$$

En estos modelos, se asume que las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  y  $F$ , son **desconocidas** en particular, así como el orden  $n$  del sistema. Que no son las propiedades asumidas por otros.

$A$  es asintóticamente estable, esto no es necesariamente asumido, ya que el rango  $B = m$ , el rango  $C = r$  o sea  $(C, A, B)$  es controlable y/o es (1) la fase mínima (tener estable transmisión ceros) [4].

### 1.1.2 Definición

Asumimos los disturbios  $w$  en (1) como medibles. Entonces allí existe un compensador estable con entrada  $\omega$  y salida  $\sigma_1$ , un compensador estable con entrada  $\gamma_{ref}$  y salida  $\sigma_2$  y matrices constantes  $K_1$ ,  $K_2$  semejantes cuando el controlador.

$$u = K_1 \sigma_1 + K_2 \sigma_2 \quad (2)$$

Es aplicado a (1) el sistema resultante teniendo esa propiedad verificándose la regulación asintótica

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad \forall w \in R^\Omega$$

$$\forall \gamma_{ref} \in R^r$$

y para todos los estados iniciales de la planta y del controlador, el controlador (2) es decir va ser un controlador para (1) [3].

El controlador

$$u = K_2 \sigma_2 \quad (3)$$

Donde  $K_2, \sigma_2$  están definidos en (2), llamado un punto fijo del controlador para (1)

El controlador

$$u = K_1 \sigma_1 \quad (4)$$

Donde  $K_1, \sigma_1$  están definidos en (2), es llamado un disturbio del controlador lazo abierto para (1).

Asumir que existe un controlador lineal de tiempo invariante para (1) tanto:

1. El sistema resultante en lazo-cerrado es asintóticamente estable.
2. Verificar la regulación asintóticamente.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

$$\forall w \in \mathbb{R}^\Omega, \quad \forall y_{\text{ref}} \in \mathbb{R}^r$$

Y para todos los estados iniciales de la planta y del controlador.

3. Propiedad sostener para todas las perturbaciones de los parámetros de la planta de (1) a tal que solamente esa perturbación no cause a la planta hacer inestable el sistema controlable resultante.

Entonces un controlador el cual satisface estas propiedades es decir un controlador robusto [3].

Un controlador robusto para (1) tiene la ventaja de regulación asintótica ocurrida por unos disturbios (conocidos o desconocidos) lo cual probablemente afectan la planta, la regulación asintótica del sistema es relativamente independiente de unas perturbaciones que ocurren en la planta. Un controlador lazo abierto Feedforward para (1) tiene la ventaja de una respuesta relativamente rápida para el sistema controlado.

Si un disturbio ocurre en el sistema, la acción correctiva tiene lugar inmediatamente. De este modo un controlador robusto feedforward que es una combinación de dos controladores superiores puede ser frecuentemente usados en la actual práctica.

Esto es deseando encontrar un controlador feedforward y/o robusto para que la planta tome estabilidad en regulación asintótica en lazo-cerrado.

En orden a determinar la existencia de una solución al problema y en orden a obtener el controlador y su punto-fijo (3). Los siguientes experimentos facilitan determinar la  $\mathfrak{S}$ , matriz de ganancia de estado sólido del sistema, requerido en "off-line" en la planta.

1. Experimento I: asumiendo que  $w = 0$

serán  $m$  experimentos separados a ser llevados en la planta.

Paso  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) aplicando una entrada  $u_i(t)$  a la planta en lazoabierto con la propiedad de que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_i(t) = \bar{u}_i$$

Ejemplo: un escalón de entrada, donde  $\bar{u}_i$  (un vector constante) es escogido linealmente independiente de  $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_{i-1}$  en el caso  $i = 1$ ,  $\bar{u}_1$  se escoge de tal forma que  $\bar{u}_1 \neq 0$ ; entonces existe un vector constante  $\bar{y}_i$  de tal manera que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \bar{y}_i$$

Medir  $\bar{y}_i$ ,

Después de realizar los pasos 1, 2,3,..., m experimentos anteriores haber corrido la salida en la planta, se calcula la matriz de  $\mathfrak{S}$  como sigue [3]:

$$\mathfrak{S} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m) (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m)^{-1} \quad (5)$$

En orden a determinar los disturbios del controlador (4), en el siguiente experimento es requerido en la planta “off-line”. Asumiendo que los disturbios de entrada  $w$  serán medidos y excitados durante el experimento.

2. Experimento II: asumiendo a  $u = 0$  durante el experimento.

En este caso el mismo procedimiento será realizado como en el experimento I corriendo la salida, excepto este tiempo, los disturbios de entrada  $w$  serán excitados en  $\Omega$  vías de cambio del control de entrada  $u$ .

Asume eso el valor de estado fijo  $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_\Omega$ , es obtenido por  $\Omega$  linealidad independiente de los disturbios de estado fijo  $\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_\Omega$ , respectivamente; entonces  $D$  será definido como:

$$D \stackrel{\Delta}{=} (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_\Omega) (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_\Omega)^{-1} \quad (6)$$

Si los disturbios  $w$  no serán excitados y/o medidos, el experimento no será sólido. Será anotado los datos de operación de la planta, que a menudo serán usados en lugar de experimento II a determinar  $D$  [3].

## 1.2 EXISTENCIA DE UNA SOLUCION A EL PROBLEMA

El siguiente resultado es obtenido.

**1.2.1 Teorema I** [3]: asume que los disturbios  $w$  son medidos; entonces allí existe un controlador Feedforward, para (1) tanto que  $e(t) \rightarrow 0$  como  $t \rightarrow \infty$ , para todo disturbio constante  $w \in \mathbb{R}^\Omega$  y todas las entradas constantes de referencia  $\gamma_{ref} \in \mathbb{R}^r$  y solamente si

$$\text{Rango } \mathfrak{S} = r \quad (7)$$

**1.2.2 Teorema II:** allí existe un controlador robusto en (1) tanto  $e(t) \rightarrow 0$  como

$t \rightarrow \infty$  para todos los disturbios constantes  $w \in \mathbb{R}^\Omega$  y todas las entradas constantes de referencia  $\gamma_{ref} \in \mathbb{R}^r$  tal que el sistema de lazo-cerrado es asintóticamente estable si y solamente si

$$\text{Rango } \mathfrak{S} = r$$

## 1.3 ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR

Asumiendo el rango de la matriz  $\mathfrak{S} = r$  y que  $w$  es medible el controlador feedforward para (1) es dado por

$$u = \mathfrak{S}^+ \gamma_{ref} - \mathfrak{S}^+ D w \quad (8)$$

donde  $\mathfrak{S}$  es dado por (5),  $D$  es dado por (6) y

$$\mathfrak{S}^+ \triangleq \mathfrak{S}' (\mathfrak{S} \mathfrak{S}')^{-1}$$

Asumiendo que el rango  $\mathfrak{S} = r$  el controlador robusto para (1) es dado por

$$u = -E \mathfrak{S}^+ \int_0^t (\gamma - \gamma_{ref}) dt \quad (9)$$

Donde  $\mathfrak{S}^+$  es dado por (5) y donde  $E > 0$  tanto encontrado aplicando el controlador (9) a la planta y llevado a la salida en “on-line” como la resultante al sistema en lazo-cerrado asintóticamente estable que tendrá la máxima velocidad de respuesta ejemplo:  $E > 0$  es ajustable, comenzando con un pequeño valor positivo, tanto que la respuesta de salida del sistema de lazo-cerrado para una etapa de función de entrada en  $\gamma_{ref}$  ( ó  $w$ ) tendrá máxima velocidad de respuesta sin ocurrir excesiva oscilación.

Si la condición (7) se sostiene, esto es siempre posible a hacer [3], asignado el valor de  $E$  será denotado por  $E^*$ . Si los disturbios  $w$  son medibles para un controlador feedforward-robust para (1) es dado por:

$$u = \mathfrak{S}^+ \gamma_{ref} - \mathfrak{S}^+ D w - E^* \mathfrak{S}^+ \int_0^t (\gamma - \gamma_{ref}) dt \quad (10)$$

donde  $D$  es dado por (6)

Si los disturbios  $w$  no son medibles entonces el termino feedforward  $\mathfrak{S}^+ D w$  es omitido para (10) y en este caso el controlador (10) hace un set-point para el controlador feedforward-robust (1).

Si el termino  $\mathfrak{S}^+ \gamma_{ref}$  es omitido desde (10), el controlador se hace un disturbio para el controlador feedforward-robust (1).

La ventaja del termino feedforward  $\mathfrak{S}^+ \gamma_{ref} - \mathfrak{S}^+ D w$  en (10) es que la acción rápida correctiva toma lugar para la desviación en el error de salida del sistema.

Otra ventaja del termino feedback lazo cerrado en (10) es que asintóticamente ocurre en todas las perturbaciones de los parámetros de la planta cuando no causan inestabilidad y para todas las otras constantes inmedibles ocurren disturbios en el sistema.

## 2. SIMULACIÓN DEL HORNO

En el capítulo anterior se dio la explicación de la existencia de una solución a un sistema MIMO y en el caso particular que estudia este escrito las características del horno; disturbios externos constantes no medibles y seguimientos de set-points constantes (escalón).

Con el fin de encontrar una solución al sistema de control y de calcular la estructura del controlador necesario, se efectúan los siguientes experimentos sobre la planta:

Experimento  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ): Aplicar una entrada  $u(t)$  a la planta en lazo abierto con la propiedad:  $\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = \bar{u}_i$

(Ejemplo un escalón de entrada), donde  $\bar{u}_i$  (un vector constante) se escoge linealmente independiente de  $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_{i-1}$  (en el caso  $i=1$ ,  $\bar{u}_1$  se escoge de tal forma que  $\bar{u}_1 \neq 0$ ); entonces existe un vector constante  $\bar{y}_i$  de tal manera que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma(t) = \bar{\gamma}_i$$

Medir  $\gamma_i$ ,

Después de realizar los  $m$  experimentos anteriores, se calcula la matriz  $\mathfrak{S}$  de la siguiente forma [3]:  $\mathfrak{S} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m) (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m)^{-1}$  **(5)**

Si el rango de la matriz  $\mathfrak{S}$  es  $r$ , existe una solución y es posible implementar un controlador con la siguiente estructura [3].

$$u = -E \mathfrak{S}^+ \int_0^t (\gamma - \gamma_{ref}) dt \quad \mathbf{(9)}$$

donde  $\mathfrak{S}^+ = \mathfrak{S}^t (\mathfrak{S} \mathfrak{S}^t)^{-1}$  (seudo inversa).

El parámetro único  $E$  se deja para calibración o sintonía on-line

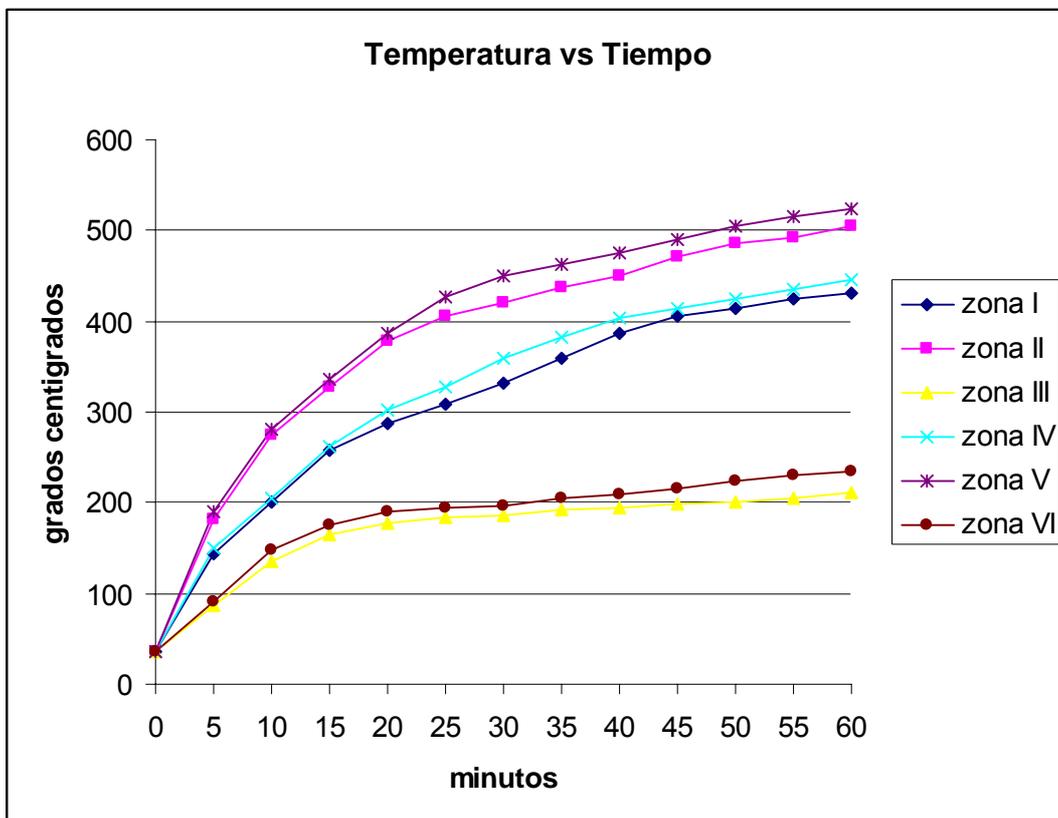
Experimentos: Durante varios días, a cada una de las zonas del horno se le aplico un escalón de potencia, conservando en cero la potencia aplicada a las zonas restantes, se utilizo como carga del horno los extractores de gases a su máxima apertura de compuertas y la malla en movimiento a una velocidad constante.

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Datos temperaturas zonas Horno**

<b>Excitación Kcal. /min.</b>	<b>Zona 1 °C</b>	<b>Zona 2 °C</b>	<b>Zona 3 °C</b>	<b>Zona 4 °C</b>	<b>Zona 5 °C</b>	<b>Zona 6 °C</b>
200	315	85	39	120	75	40
220	90	346	60	75	130	44
150	60	95	185	60	75	60
220	130	78	40	345	82	44
250	80	140	44	90	390	70
180	65	80	70	70	100	215

**Figura 3. Respuesta del Horno sin control. Grados centígrados vs Tiempo**



Desarrollando y dando solución a la matriz  $\mathfrak{S}^+$  resultante se muestra el siguiente cuadro:

**Tabla 2. Cuadro matriz de ganancia**

0.78	-0.09	-0.05	-0.21	-0.049	-0.049
-0.124	0.808	-0.17	-0.05	-0.197	-0.020
-0.058	-0.173	0.98	-0.06	-0.07	-0.19
-0.266	-0.05	-0.06	0.78	-0.07	-0.06
-0.05	-0.24	-0.011	-0.09	0.8	-0.17
-0.06	-0.06	-0.2	-0.07	-0.15	1

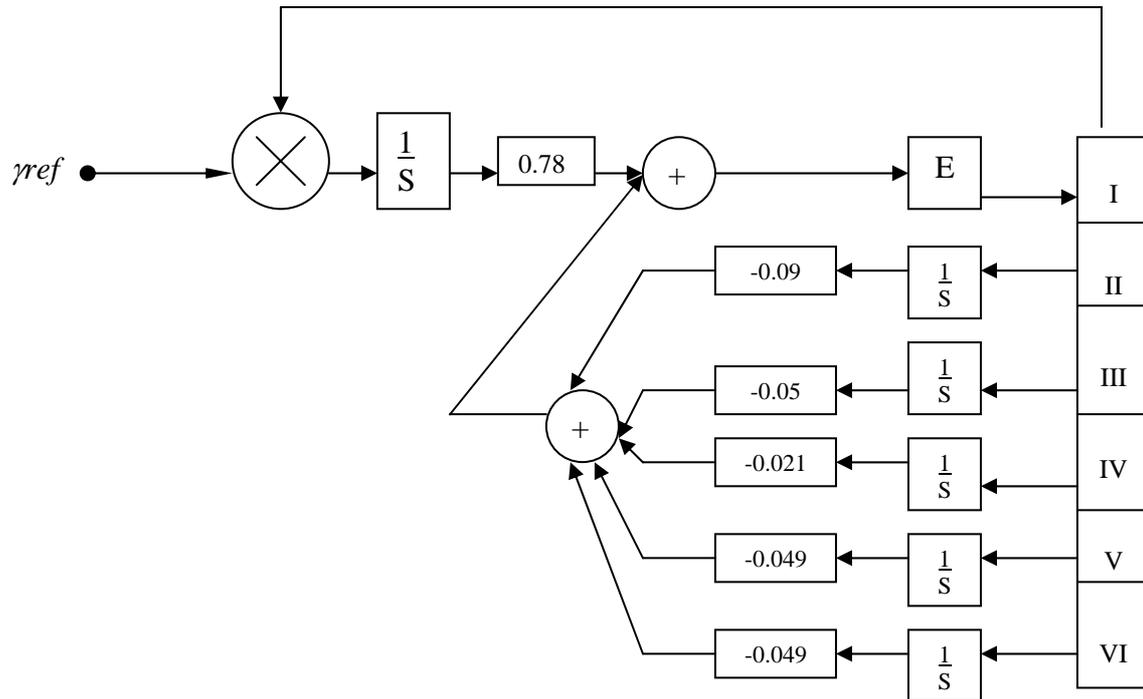
De los resultados anteriormente relacionados se concluye que el rango de esta matriz es seis, lo cual indica una solución al problema de control planteado en comienzo.

La estructura del controlador esta dada por la ecuación

$$V = - E \mathfrak{S}^+ \int_0^t (\gamma - \gamma_{ref}) dt$$

Donde  $\mathfrak{S} = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) (u, u_2, \dots, u_n)^{-1}$  y E es encontrado para el controlador como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Diagrama controlador resultante



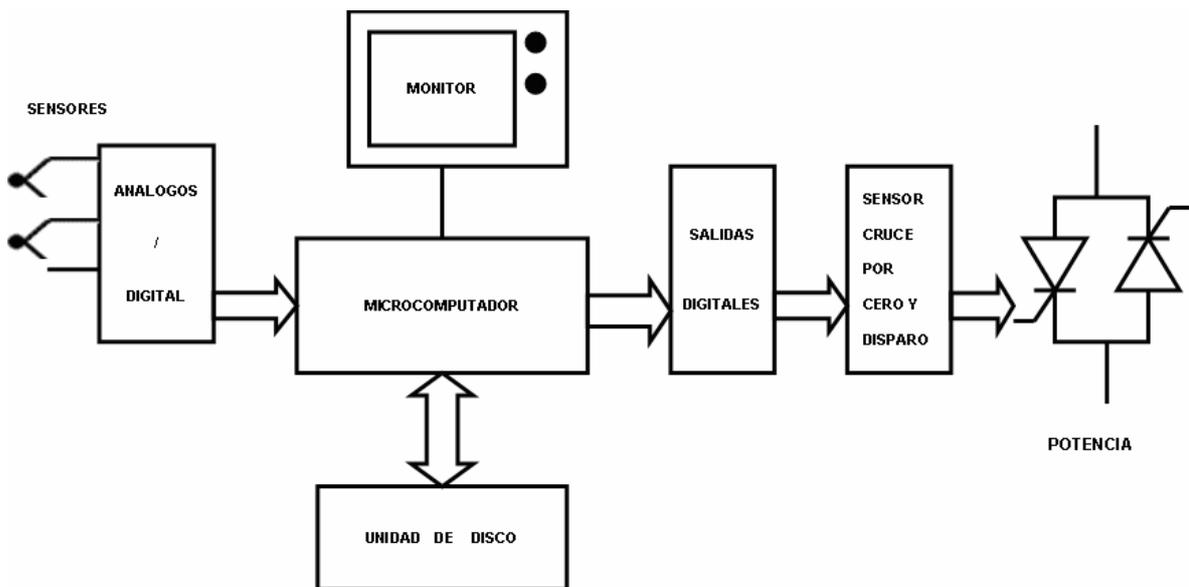
La figura anterior muestra un fragmento tipo de controlador resultante; como se aprecia posee una forma aparentemente compleja, se puede implementar usando una arquitectura estándar de microcomputador, interfase A/D, memoria y programa almacenado.

Al mismo tiempo Presenta una similitud al control PI tradicional de la estructura SISO pero considera los efectos de la interacción de las otras salidas (zonas).

### 3. SISTEMA DE CONTROL

Al concluir el proceso del algoritmo de control el cual servirá para su implementación, se diseño y se construyo el HARDWARE como se puede apreciar en la figura 5.

**Figura 5. Arquitectura del sistema**



Como unidad central de procesamiento se selecciono un equipo de cómputo de bajo costo, que cumplía todas las exigencias del Hardware desarrollado, en lo relacionado con la velocidad de respuesta y la capacidad de memoria.

Se diseñaron las tarjetas electrónicas tanto para la lectura de la medida de las temperaturas de las zonas como para las señales digitales, las salidas de potencia y las señalizaciones.

#### 3.1 PROGRAMA CONTROL HORNO

El algoritmo de control implementado se realizo en un lenguaje de alto nivel (**Basic**), las rutinas inicializadoras de las interfases y el manejo de los convertidores se trazaron en lenguaje de maquina.

### 3.1.1 Lenguaje de la maquina

Un programa en lenguaje maquina o “de maquina”, no es más que una serie de instrucciones almacenadas en memoria.

Cuando un microprocesador comienza su ciclo de instrucción, irá a buscar el primer código de operación de su programa y después realizará la operación especificada por ese código de operación. Cada instrucción del lenguaje de maquina se almacena como un código de operación de 1 byte, que puede ir seguido por 1 ó 2 bytes del operando.

Por lo tanto un programa en lenguaje máquina podría ser “A9 05 20 02 04 A2 F5” una serie de números hexadecimales en este caso, pero son precisamente estos números los que la computadora entiende. [6]

### 3.1.2 Estructura

La estructura del programa la podemos mostrar en pseudo código como sigue:

```
Inicializar interfase;  
Precalentar horno;  
Do while T muestreo = cumplido
```

Begín

```
For I = 1 to numero de zonas  
Activa A/D  
Medir temperatura en zona (I);  
End for
```

```
For I = 1 to numero de zonas  
Calcular ley de control U (I)  
Multiplicar U (I) por E  
End for
```

```
For I = 1 to numero de zonas
```

Programar en ON temporizador (I)

Excitar Deltas de potencia

End for

END

Mostrar en pantalla temperatura y Hora.

### 3.2 PROGRAMA EN BASIC

```
10 IF T=0 THEN T=1: LOAD "SYSHORNO10", 8, 1
15 DIM X(40), W(40)
20 REM PROGRAMACION DE PIAS
25 SYS 28672
26 GOSUB 8000
27 PRINT {CLR} ": PRINT: PRINT
28 INPUT "ENTRE LA HORA : "; T$
29 T1$=T$
30 PRINT {CLR} ": PRINT: PRINT
90 POKE 53280, 0: POKE 53281, 0
99 PRINT "
100 PRINT "          CONTROL DE TEMPERATURA "
101 PRINT "
102 PRINT "
103 PRINT "          HORNO CAMPBELL "
105 PRINT "
150 FOR I=1 TO 2000: NEXT I
155 D=1: REM DIFERENCIAL DE TEMPERATURA
160 GOSUB 6000
180 ZA = W (9): TA = W (1) + Y
185 ZB = W (11): TB = W (2) + Y
190 ZC = W (12): TC = W (3) + Y
195 ZD = W (13): TD = W (4) + Y
200 ZE = W (14): TE = W (5) + Y
205 ZF = W (15): TF = W (6) + Y
```

```

490 IF II=0 THEN GOSUB 10000
500 H=7: V=11: GOSUB 4000: PRINT "        "ZA
510 H=20: V=11: GOSUB 4000: PRINT "        "ZC
520 H=34: V=11: GOSUB 4000: PRINT "        "ZE
530 H=7: V=13: GOSUB 4000: PRINT "        "TA
540 H=20: V=13: GOSUB 4000: PRINT "        "TC
550 H=34: V=13: GOSUB 4000: PRINT "        "TE
560 H=7: V=17: GOSUB 4000: PRINT "        "ZB
570 H=20: V=17: GOSUB 4000: PRINT "        "ZD
580 H=34: V=17: GOSUB 4000: PRINT "        "ZF
590 H=7: V=19: GOSUB 4000: PRINT "        "TB
600 H=20: V=19: GOSUB 4000: PRINT "        "TD
610 H=34: V=19: GOSUB 4000: PRINT "        "TF
615 H=15: V=22: GOSUB 4000: PRINT "        "TI$
620 IF II=0 THEN II=1
640 P1=ZA – TA
650 IF P1 > D THEN CP = 4: GOSUB 9000: GOTO 670
660 IF P1 < -D THEN CA = 251: GOSUB 9500
670 P2 = ZB – TB
680 IF P2 > D THEN CP = 8: GOSUB 9000 GOTO 700
690 IF P2 < -D THEN CA = 247: GOSUB 9500
700 P3 = ZC – TC
710 IF P3 > D THEN CP = 16: GOSUB 9000: GOTO 730
720 IF P3 < -D THEN CA = 239: GOSUB 9500
730 P4 = ZD – TD
740 IF P4 > D THEN CP = 32: GOSUB 9000: GOTO 760
750 IF P4 < -D THEN CA =223: GOSUB 9500
760 P5 = ZE – TE
770 IF P5 > D THEN CP = 64: GOSUB 9000: GOTO 790
780 IF P5 < -D THEN CA =191: GOSUB 9500
790 P6 = ZF – TF
800 IF P6 > D THEN CP = 128: GOSUB 9000: GOTO 830
810 IF P6 < -D THEN CA =127: GOSUB 9500
830 FOR X = 1 TO 1000: NEXT

```

850 GOTO 160

4000 REM SUBRUTINA HTAB – VTAB

4010 PRINT" {HOME} “

4020 FOR T = 1 TO H

4030 PRINT" {C/RT}”;

4040 NEXT T

4050 FOR T = 1 TO V

4060 PRINT" {C/DN}”;

4070 NEXT T

4080 RETURN

6000 REM SUBRUTINA CONVERSION ANALOGA/DIGITAL

6010 SYS 28928

6020 A = 29952

6030 FOR I = 1 TO 16: REM 16 CANALES

6040 X (I) = PEEK (A)

6050 W (I) = X (I) \* 500 / 255: REM CONVERSION

6060 W (I) = INT (W (I))

6070 A = A + 1

6080 NEXT I

6090 Z=PEEK (29967): REM LECTURA TEMPERATURA AMBIENTE

6100 Y=Z\*1050/ (1050+200E3): REM CONVERSION A TERMOCUPLA J

6110 Y=INT (Y\*200)

6120 Y=Y-132: REM RESTA GRADOS KELVIN

6200 RETURN

8000 POKE \$DE11, 4

8010 GOSUB 9800

8020 POKE \$DE11, 12

8030 GOSUB 9800

8040 POKE \$DE11, 28

8050 GOSUB 9800

8060 POKE \$DE11, 60

```

8070 GOSUB 9800
8080 POKE $DE11, 124
8090 GOSUB 9800
8100 POKE $DE11, 252
8110 RETURN

```

```

9000 PY=PEEK ($DE11)
9010 PY=PY OR CP
9020 POKE $DE11,PY
9030 RETURN
9500 PX=PEEK ($DE11)
9510 PX=PXANDCA
9520 POKE $DE11, PX
9530 RETURN

```

```

9800 FOR X=1 TO 2000: NEXT
9810 RETURN

```

```

10000 PRINT"
10010 PRINT"          SISTEMA COMPUTARIZADO
10020 PRINT"
10030 PRINT"          HORNO CAMPBELL
10040 PRINT"
10050 PRINT: PRINT
10060 PRINT"      ZONA I          ZONA II          ZONA III"
10070 PRINT: PRINT: PRINT
10080 PRINT" TEMP.D "ZA
10090 PRINT"          TEMP.D "ZC
10100 PRINT"          TEMP.D "ZE
10110 PRINT" ..... "
10111 PRINT"          ..... "
10112 PRINT"          ..... "
10120 PRINT" TEMP.AR" TA
10130 PRINT"          TEMP.AR" TC

```

```

10140 PRINT"                                TEMP.AR" TE
10150 PRINT: PRINT: PRINT
10160 PRINT" TEMP.D" ZB
10170 PRINT"                                TEMP. D" ZD
10180 PRINT"                                TEMP.D" ZF
10190 PRINT" ..... "
10191 PRINT"                                ..... "
10192 PRINT"                                ..... "
10200 PRINT" TEMP.AB" TB
10210 PRINT"                                TEMP.AB" TD
10220 PRINT"                                TEMP.AB" TF
10300                                PRINT: PRINT"

```

=====

```

10310 PRINT"                                HORA : " TI$
10320 RETURN.

```

READY.

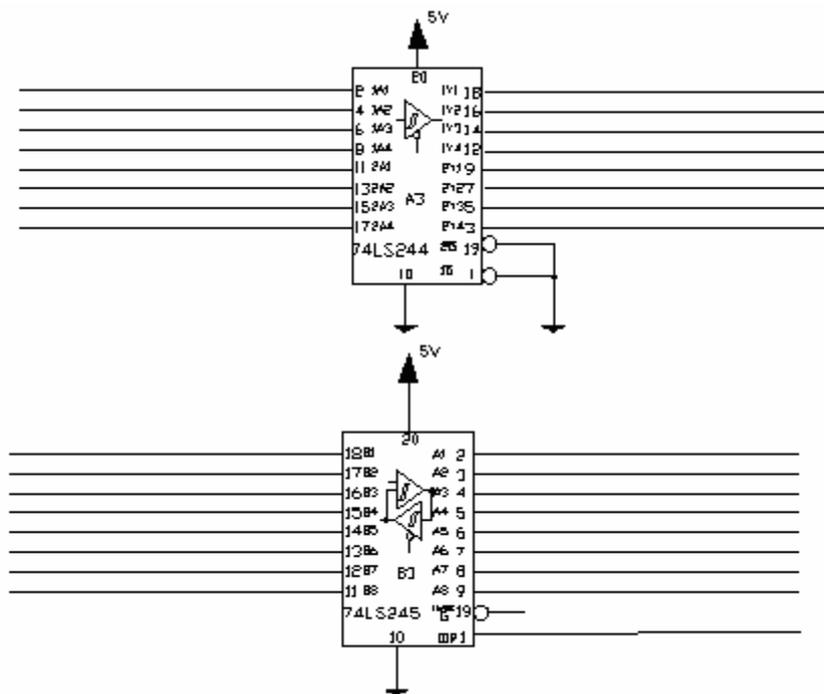
## 4. HARDWARE

### 4.1 TARJETA INTERFASE DEL MICROCOMPUTADOR

Para la comunicación con el mundo exterior del Computador se diseño una tarjeta buffer / drivers para aumentar el desempeño y la densidad de la tarjeta principal que se conecta al puerto paralelo.

La tarjeta esta constituida por dos circuitos integrados Octal Tri-State Buffers **74LS244** y Octal Tri-State Transceiver **74LS245** que son circuitos de ocho (8) salidas, tres (3) estados con buen nivel de rechazo al ruido y una alta carga de las líneas de salida [7], el 74LS245 también es de ocho (8) salidas asincrónicas bidireccionales para el bus de datos minimizando el tiempo de requerimientos y el circuito integrado Decodificador / Multiplexor **74LS138**. [8]

Figura 6. IC's 74LS244 y 74LS245



### 4.2 TARJETA INTERFASE DE VIA's

Para la comunicación digital tanto de captura de señales discretas como la salida del Computador, se diseño una tarjeta de PIA's (Peripheral Interfase

Adapter) también denominada **VIA's** (Versatile Interfase Adapter) que facilita la captura de la información.

#### **4.2.1 Introducción**

Los circuitos integrados **6522** proporcionan toda la capacidad de la familias de los 6520, que son Adaptadores de interfases.

Igualmente, este dispositivo contiene un par de cronómetros de intervalo de tiempo muy poderosos, un shift register serie a paralelo / paralelo a serie y datos latching de entrada en los puertos periféricos.

La capacidad de expansión de este elemento permite el mando de datos bidireccionales transferidos entre VIA's y los sistemas de procesador múltiples.

El mando de dispositivos periféricos se ocupa principalmente a través de dos puertos bidireccionales de 8-bits.

Cada una de estas líneas puede programarse para actuar como una entrada o una salida. También, pueden controlarse varias líneas de I/O periféricas directamente de los cronómetros de intervalo de tiempo para la frecuencia generadora programable de ondas cuadradas y por contar los pulsos externamente generados.

Además de facilitar el mando de los muchos rangos poderosos de este integrado, los registros internos han sido organizados en un registro de bandera de interrupción, vale la pena acotar que una interrupción habilita el registro y un par de registros de mando de función.

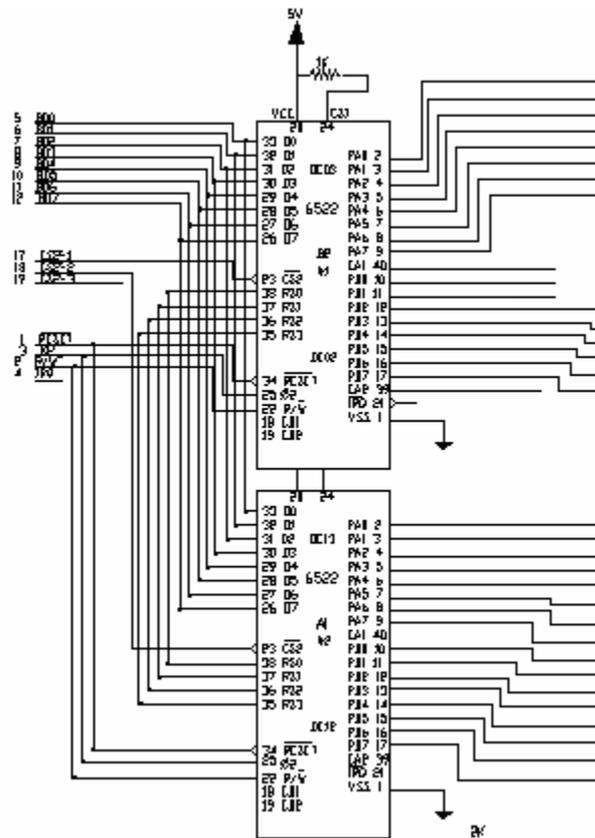
Son de Canal N, tecnología de carga de vaciamiento, con una sola fuente de Voltaje de +5v.

Completamente estático y compatible con tecnología TTL.

Las líneas del mando periféricas son compatibles con CMOS.

La capacidad extendida “handshake” permite mando muy positivo de transferir los datos entre el procesador y los dispositivos periféricos.

**Figura 7. PIA 6522**

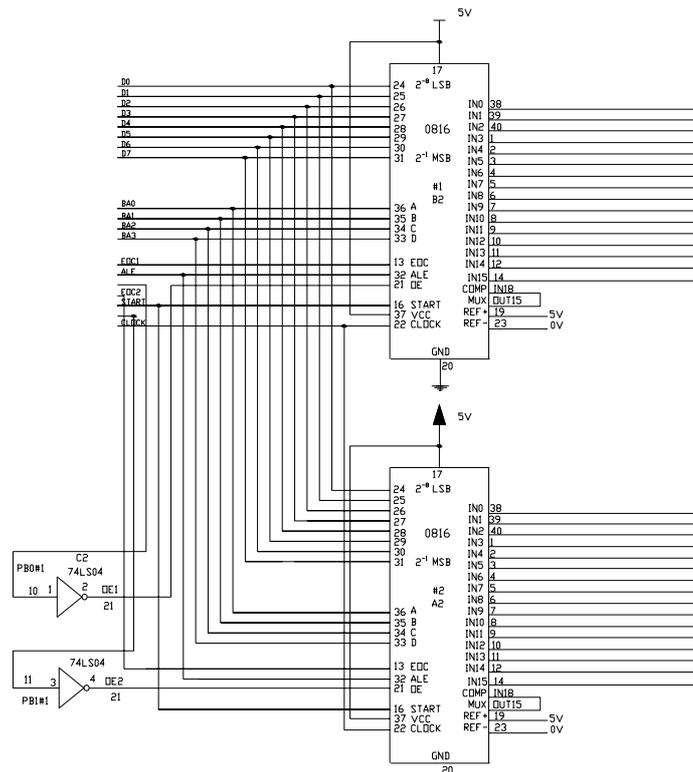


### 4.3 TARJETA ANÁLOGA / DIGITAL

Todas las señales análogas se deben convertir en señales digitales para lograr procesarlas, para esto se debe utilizar circuitos integrados Convertidores Analog to Digital Converters **ADC 0816**. [9]

Estos son circuitos de 8 bit's a 16 canales multiplexados compatibles con control lógico, la conversión se realiza por técnicas de registro de aproximación sucesivas de muy buena linealidad que no requiere ajuste de offset, son de fácil interfase con microprocesadores y bajo consumo de potencia. [10]

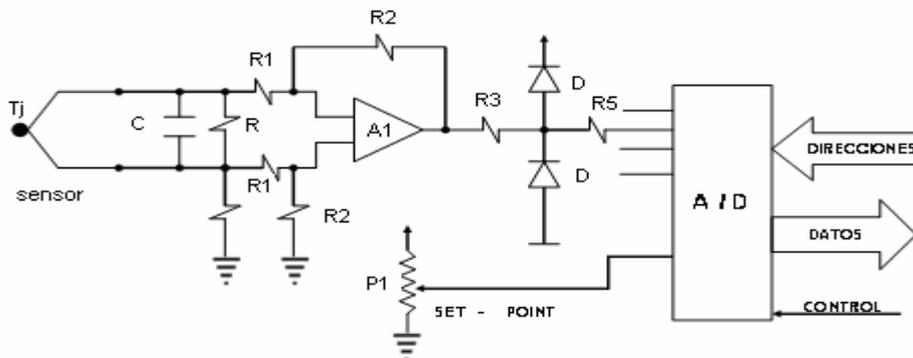
**Figura 8. Converter 0816**



#### 4.4. TARJETA DE ENTRADA ANÁLOGA

Para medir las temperaturas de las diferentes zonas de calentamiento y la temperatura ambiente de referencia se diseñó la interfase Análoga / Digital como se puede apreciar en la siguiente figura:

**Figura 9. Conexión de Termocuplas al convertidor**



Para censar la temperatura de las diferentes zonas se emplearon termocuplas tipo J y se diseño una tarjeta que consta de un amplificador diferencial, un circuito detector de termocupla abierto y un filtro por cada zona, luego estas señales son llevadas a la tarjeta convertidora Análoga / Digital de 16 canales.

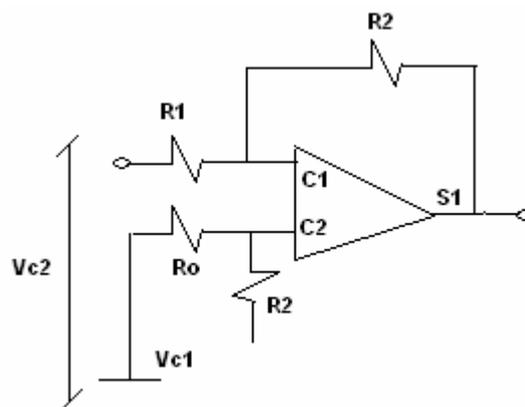
Para el sensor de temperatura ambiente se utilizo el circuito integrado de Voltaje de referencia **LM329**, el cual es un circuito de precisión compensado de temperatura de 6.9 Voltios de referencia, con la característica que puede trabajar en el rango entre 0 – 70 °C. [11]

Para el ajuste de los set-point's de las temperaturas deseadas se utilizaron potenciómetros de 10K Ohmios, cuya señal es llevada a esta tarjeta convertidora Análoga / Digital.

En este diseño se utilizo el amplificador operacional **LM741** como amplificador de tensión el cual suministra una tensión proporcional a la tensión de entrada.

El circuito utilizado es un tipo sustractor basado en la utilización del modo común; con el circuito de la figura es posible realizar la diferencia entre las tensiones  $V_{e1}$  y  $V_{e2}$  de las entradas.

**Figura 10. Amplificador en modo común**



Si la influencia de  $Z_0$  del amplificador es despreciable, o bien, si su ganancia  $A_v$  es infinita, se puede plantear lo siguiente:

$$A_{vr} = \frac{V_{S1}}{V_{e1} - V_{e2}} = \frac{R_2}{R_1}$$

En efecto

$$V_{S1} = V_{e1} \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right] - V_{e2} \left[ \frac{R_2}{R_1} \right]$$

Puesto que el montaje no posee masa ficticia en  $e_1$  o  $e_2$ , la realización de un sustractor de entradas múltiples precisa tener en cuenta todos los elementos para determinar las ganancias de cada entrada. [12]

Para ajustar el voltaje Offset Null del amplificador se realizó la conexión un potenciómetro entre los terminales 1 y 5 y el centro a una fuente de voltaje de - 12 Vdc.

Si tenemos una ganancia  $A_{vr} = 100$  y una resistencia  $R_2 = 680 \text{ K}\Omega$  entonces obtenemos una resistencia  $R_1 = 6.8 \text{ K}\Omega$

El condensador  $C = 0.1 \mu\text{f}$  en la entrada de cada amplificador nos garantiza eliminar las altas frecuencia que puedan inducirse en las líneas de conducción de las señales de los sensores, al igual que el limitador conformado por los diodos D1 y D2 a la salida del amplificador.

Las demás señales de los potenciómetros que son los set-point de cada zona van conectadas directamente a los convertidores como se puede ver en el plano OP-100-06 pg 13. (Ver anexos).

#### 4.5 TARJETA CIRCUITO DETECTOR DE PASO POR CERO

Este circuito sencillo se emplea para hacer una sincronización precisa con la frecuencia de la línea de potencia de corriente alterna, ya que genera un pulso en los instantes en que la onda del voltaje alterno pasa por cero.

Para este circuito se utilizaron Opto-Acopladores **MTC2 / 4N26** llamados también opto-aisladores o foto-acoplador que son componentes electrónicos sencillos que tienen dos elementos internos: una fuente de luz que es un diodo LED (Light emite diodo) y un foto-detector o un fototransistor que en este caso en particular es el elemento sensible a la luz, de esta forma se puede decir que un foto transistor es un transistor que en cambio de base tradicional, tiene un elemento sensible a la luz que le llega del LED y conduce entre emisor y colector; los dos elementos están separados entre si por un aislante transparente y el conjunto esta completamente sellado por un empaque lo que hace que soporte niveles elevados de tensión.

Se realiza la conexión de un transformador de voltaje al sistema de potencia de 440 Voltios a.c. cuya relación de tensión es de 440 / 24 VAC y en el secundario se conectan los opto-acopladores en antiparalelo como muestra la figura 12. La salida de los fototransistores conectados en paralelo con el emisor en modo común y una resistencia de carga de 4,7 K $\Omega$  de donde se acopla esta señal a dos inversores smith trigger **74LS14** que al final genera un pulso en el instante en que la onda alterna pasa por cero.

Para el cálculo de las resistencias, como las tensiones superan los niveles admisibles por los diodos se utilizan resistencias limitadoras para controlar el paso de la corriente.

Las características técnicas del foto-acoplador son:

Referencia:

MTC2 / 4N26 NPN transistor

Voltaje de aislamiento: 7500 V

Corriente delantero LED If: 80 ma. (máx.)

Voltaje inverso LED  $V_r$ : 3 V  
 Voltaje colector-base  $V_{cbo}$ : 70 V  
 Voltaje colector-emisor  $V_{ceo}$ : 30 V  
 Corriente de colector  $I_c$ : 80 ma.  
 Potencia total  $P_t$ : 250 Mw.

Se selecciono una corriente de 20 mA para garantizar el disparo y un voltaje de diodo de 2 V

$$RL = \frac{V_{rms} - V_d}{I_f} \text{ entonces } RL = \frac{24 - 12}{0.020} = 1100$$

$$P = RL * I_f^2 = 1100 * 0.020^2 = 0.44W$$

Comercialmente se adquieren de 1.200 Ohmios a 1 vatio.

Para la resistencia de carga de los transistores se tiene lo siguiente:

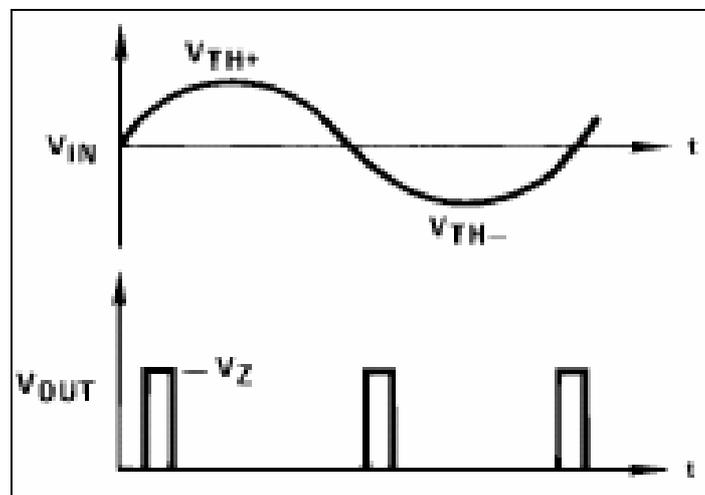
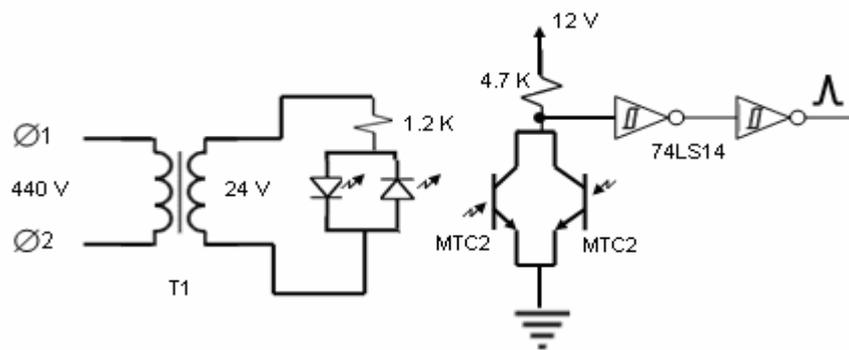
$$RL = \frac{V_{cc} - V_{be}}{I_c}$$

$$RL = \frac{12 - 0.6}{0.003} = 3800$$

$$P = RL * I_c^2 = 3800 * 0.003^2 = 0.034W$$

Comercialmente se adquieren de 4.700 Ohmios 1 vatio.

**Figura 11. Circuito sensor de cruce por cero**



## 4.6 ETAPA DE SALIDA DE POTENCIA

Para la etapa de salida de potencia se utilizaron dispositivos de estado sólido o semiconductores de potencia como son los tiristores.

Los tiristores son interruptores o conmutadores con alta capacidad de conducción de la corriente eléctrica.

### 4.6.1 Tiristor o SCR (Silicon Controlled Rectifier)

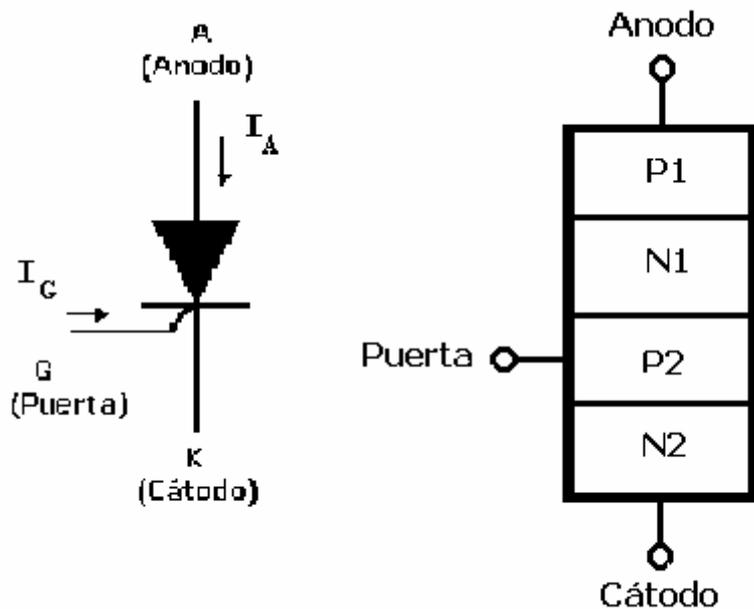
Son componentes electrónicos de estado sólido de conmutación que se utilizan en circuitos de corriente continua y que se pueden controlar. Esta

construido con tres terminales: Ánodo (**A** anode), cátodo (**K** katode), y un tercero denominado puerta (**G** gate).

Este es un dispositivo unidireccional que solo circula la corriente eléctrica en un solo sentido, desde el ánodo al cátodo como un diodo rectificador semiconductor pero que es controlado a través de la puerta, que sería la versión en estado sólido de los antiguos tubos tiratrones (tubos electrónicos al vacío con vapor de mercurio) y de ahí su nombre **Terminal** y **transistor**.

Este elemento consta de dos estados: uno **ON** (conducción) y otro **OFF** (sin conducir), si el valor del voltaje  $V_{GK}$  es el adecuado conduce desde el ánodo al cátodo. [13]

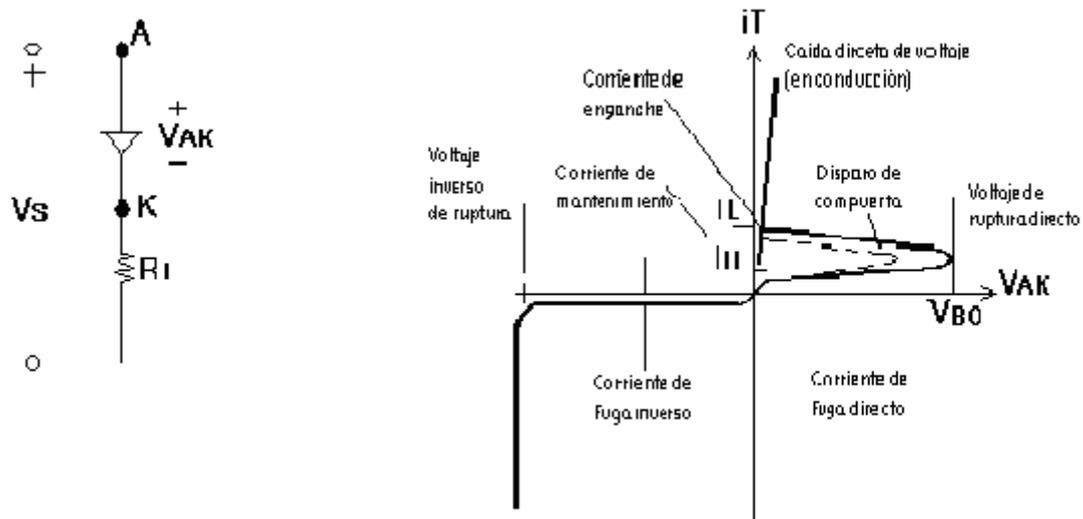
**Figura 12. Componentes de un Tiristor**



En el estado activo, la corriente del ánodo está limitada por una impedancia o una resistencia externa de carga  $R_L$ , tal y como se muestra en la figura 14. La corriente del ánodo debe ser mayor que un valor conocido como corriente de enganche  $I_L$ , a fin de mantener la cantidad requerida de flujo de portadores a través de la unión; de lo contrario, al reducirse el voltaje del ánodo al cátodo, el dispositivo regresará a la condición de bloqueo. La corriente de enganche,  $I_L$ , es la corriente del ánodo mínima requerida para mantener el tiristor en

estado de conducción inmediatamente después de que ha sido activado y se ha retirado la señal de la compuerta. En la figura 14 muestra una gráfica característica Voltaje – Corriente de un tiristor.

**Figura 13. Circuito Tiristor y curva característica Voltaje – Corriente**



#### 4.6.1.1 Características generales del Tiristor

- Interruptor casi ideal.
- Soporta Altas tensiones.
- Amplificador eficaz.
- Es capaz de controlar grandes potencias.
- De fácil controlabilidad.
- Relativa rapidez.
- Características en función de situaciones pasadas (memoria).

#### 4.6.1.2 Características estáticas del Tiristor

Las características estáticas corresponden a la región ánodo – cátodo y son los valores máximos que colocan al elemento en límite de sus posibilidades:

- Tensión inversa de pico de trabajo.....:  $V_{RWM}$

- Tensión directa de pico repetitiva.....:  $V_{DRM}$
- Tensión directa.....:  $V_T$
- Corriente directa media.....:  $I_{TAV}$
- Corriente directa eficaz.....:  $I_{TRMS}$
- Corriente directa de fugas.....:  $I_{DRM}$
- Corriente inversa de fugas.....:  $I_{RRM}$
- Corriente de mantenimiento.....  $I_H$

Las **características térmicas** a tener en cuenta al trabajar con tiristores son:

- Temperatura de la unión .....:  $T_j$
- Temperatura de almacenamiento .....:  $T_{stg}$
- Resistencia térmica contenedor-disipador .....:  $R_{c-d}$
- Resistencia térmica unión-contenedor .....:  $R_{j-c}$
- Resistencia térmica unión-ambiente.....:  $R_{j-a}$
- Impedancia térmica unión-contenedor.....  $Z_{j-c}$

#### 4.6.1.3 Características de control

Corresponden a la región puerta-cátodo y determinan las propiedades del circuito de mando que responde mejor a las condiciones de disparo.

Los fabricantes definen las siguientes características:

- Tensión directa máx. ....:  $V_{GFM}$
- Tensión inversa máx. ....:  $V_{GRM}$
- Corriente máxima.....  $I_{GM}$
- Potencia máxima.....  $P_{GM}$
- Potencia media.....:  $P_{GAV}$
- Tensión puerta-cátodo para el encendido.....:  $V_{GT}$
- Tensión residual máxima que no enciende ningún elemento.....:  $V_{GNT}$
- Corriente de puerta para el encendido.....:  $I_{GT}$
- Corriente residual máxima que no enciende ningún elementó.....:  $I_{GNT}$

Entre los datos anteriores destacan:

- $V_{GT}$  e  $I_{GT}$ , que determinan las condiciones de encendido del dispositivo semiconductor.
- $V_{GNT}$  e  $I_{GNT}$ , que dan los valores máximos de corriente y de tensión, para los cuales en condiciones normales de temperatura, los tiristores no corren el riesgo de dispararse de modo indeseado.

#### 4.6.2 Triac

Es un tiristor bidireccional que se utiliza en circuitos de corriente alterna, es hecho de forma análoga por dos tiristores colocados en antiparalelo. Sus terminales se denominan **Principal 1 (MT1)**, Terminal **Principal 2 (MT2)** y su electrodo de control se denomina **Puerta (G gate)**, si el voltaje  $V_{G1}$  entre G y MT1 es suficientemente positivo, en el primer ciclo de la corriente alterna conduce de MT2 hacia MT1 y si el voltaje  $V_{G1}$  suficientemente negativo conduce desde MT1 hacia MT2.

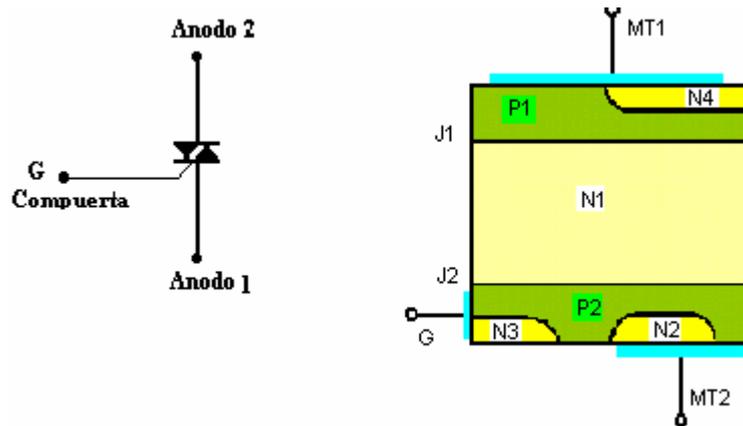
Todos los diodos semiconductores de silicio, los SCR y los Triac's se construyen uniendo semiconductores tipo **P** de silicio dopados con elementos del grupo III-A como el aluminio **Al**, Galio **Ga** o Indio **In**, y semiconductores tipo **N** de silicio dopados con elementos del grupo V-A como fósforo **P**, arsénico **As** o antimonio **Sb**.

Mientras que un diodo rectificador NP esta formado por una unión de dos capas, una tipo N (el cátodo) y otra tipo P (el ánodo), el SCR está formado por cuatro capas PNPN de semiconductores: tipo P (el ánodo), tipo N, tipo P ( la puerta) y tipo N (el cátodo).

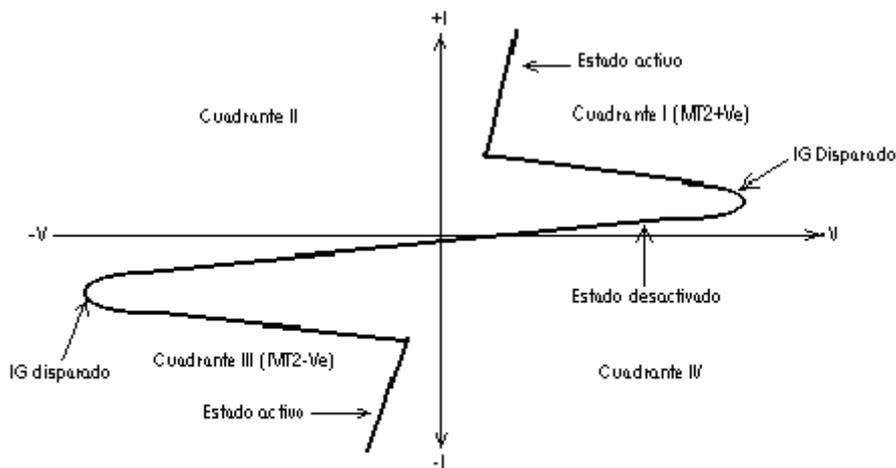
El Triac esta hecho de forma similar a dos SCR's colocados en antiparalelo, como si fuese un dispositivo de 5 capas NPNPN de semiconductores. Su estructura central es un sándwich: tipo P, tipo N y tipo P como el tiristor, pero el

material tipo N se funde sobre ambas capas tipo P, para que funcionen como cátodos K en cada uno de los sentidos de conducción. El **MT2** se conecta a una capa tipo P y a la tipo N difundida sobre ella. En el otro lado se hace lo mismo con el **MT1** y la puerta **G** también esta en contacto con la capa tipo P y una porción de tipo N difundida sobre ella. [14]

**Figura 14. Componentes de un Triac**



**Figura 15. Curva característica V – I de un Triac**



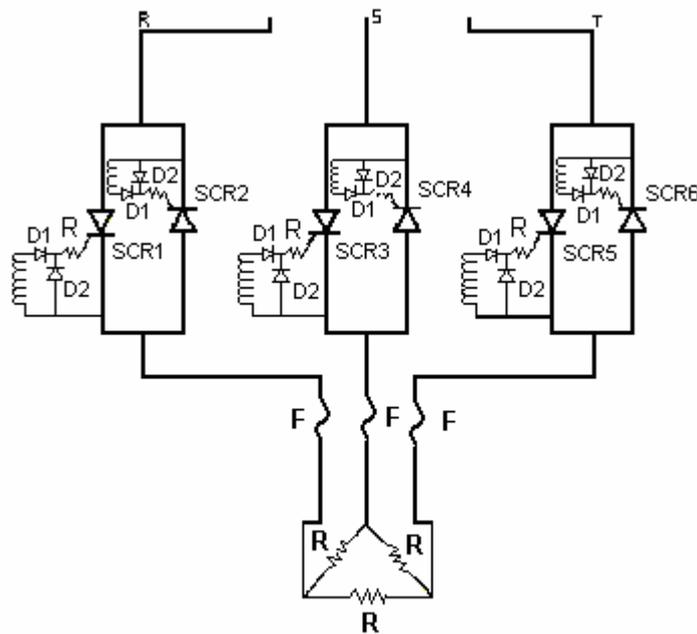
#### 4.6.3 Tarjeta salida potencia

Para el diseño de esta tarjeta se selecciono el SCR's por su capacidad de manejo de potencia y se construyo el Triacs motivo por el cual se acoplo en forma antiparelelo como lo indica la teoría.

Los SCR's que se utilizaron son de marca International Rectifier con capacidad de 600 voltios y corriente de 225 amperios montados en disipadores de calor de aluminio.

La tarjeta de potencia se diseño para el disparo de los SCR's con transformadores de aislamiento con relación 1:1 como se aprecia en la siguiente figura.

**Figura 16. Circuito de potencia**



#### 4.6.3.1 Disparo de SCR's

Para el disparo de los tiristores se utilizaron transformadores de impulso de núcleo de ferrita con una relación 1:1 y diodos de silicio **1N600** con resistencia de acoplamiento **R** al gate del SCR, como se pudo apreciar en la figura 17.

#### 4.6.3.2 Cálculos

El sistema de resistencias en cada una de las zonas estaba constituido por tres bancos de resistencias con conexión en Delta a tres fases 440 voltios y cada banco de resistencias formado por seis resistencias tubulares de 5.000 vatios a 230 voltios, conectadas dos en serie por cada fase para un total de 10.000 vatios por fase a 440 voltios.

Se instalaron resistencias a 230 voltios por ser más confiables en la parte de aislamiento de la cerámica interna que las de 440 voltios, lo que garantiza más seguridad y durabilidad.

En un sistema trifásico que alimenta a un sistema totalmente resistivo el Factor de Potencia es 1 donde:

$$\cos \phi = 1$$

Potencia = 2 x 5000 x 3 fase = 30.000 vatios por banco

Potencia total por zona = 30000 vatios x 3 bancos = 90.000 = 90 Kw.

Potencia Horno = 90.000 vatios X 6 zonas = 540.000 = 540 Kw.

Zona de precalentamiento 30.000 vatios

**Potencia total** = 540.000 + 30.000 = 570.000 = 570 Kw.

**Tensión de alimentación** = 440 Voltios 3 fases 60 Hz.

$$\begin{aligned} \text{Corriente de consumo por zona} &= \frac{Kwx1000}{1.73xEx\cos \phi} \\ &= \frac{90.000}{1.73x440} = 118 \text{ Amperios} \end{aligned}$$

$$\text{Corriente de consumo del Horno} = \frac{570.000}{1.73x440} = 750 \text{ Amperios}$$

En la selección de los SCR's se escogieron dispositivos de mayor capacidad en corriente al consumo de 118 amperios por fase en cada una de las zonas y que según tabla anexo 1 de la International Rectifier el SCR indicado es el **S23D** con capacidad de 175-250 amperios y de 200-2000 voltios. [anexo1]

## CONCLUSIONES

- Se implemento un sistema de Control Automático de Temperatura usando técnicas de calibración de sistemas multivariables.
- El resultado fue muy satisfactorio como lo indican las tablas y resultados obtenidos.
- El consumo de energía eléctrica disminuyo en un 20%.
- El costo de fabricación disminuyo en un 35%.
- Los costos más bajos de por unidad de fabricación.
- Ajustando un único parámetro E se calibra el funcionamiento el horno.
- No es necesario calibrar tantos parámetros como en un sistema tradicional SISO (PID) donde se tendría que ajustar tres parámetros por zona.
- El sistema de Hardware implementado es muy flexible pues permite cambios en el algoritmo de control en cualquier momento (Ejemplo: ON-OFF, P.I., etc.).
- No obstante las dimensiones de la potencia manejada el sistema diseñado ha demostrado gran confiabilidad y eficiencia.
- Se mejoro el sistema de regulación de la demanda máxima.

- La eficiencia de la línea de producción se incremento en un 150 % aproximadamente al pasar de 500 Kg. /h a 750 Kg. /h de producto horneado.
- La calidad del producto se mejoro sustancialmente al reducir el retrabado de producto por rechazado de color oscuro en un 90%.
- Es muy importante señalar que la utilización de estas técnicas de calibración de sistemas desconocidos es de mucha utilidad cuando se trata de adaptar equipos costosos a circuitos de control y mando modernos; como es el caso de la gran mayoría de la maquinaria existente en las industrias de los países en vía de desarrollo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. G. Ziegler and B. Nichols. "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, Vol. 65, pag.759, 1942.
- [2] F. G. Shinskey. Process Control System. New York. McGraw-Hill, pag. 101-103, 1967.
- [3] E. J. Davison, "Multivariable tuning regulators: The feed forward and robust control of a general servo mechanism problem", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol AC-21, pag. 35-47, Feb. 1976.
- [4] E. J. Davison, "Properties and calculation of transmission zeros of linear multivariable time-invariant systems", Automatic, Vol 10, pag. 643-658, 1974.
- [5] John Helborn, Ran Talbott, "COMMODORE 64 Guía del Usuario", Osborne/McGraw-Hill, pags. 1-38, 1983.
- [6] Ken Skier, "Programación en lenguaje Ensamblador para VIC-20 y Commodore 64, Byte Books/McGraw-Hill, Págs. 13-14, 1985.

**[7]** National Semiconductor 1984, "LOGIC Databook" volume I, pags. 3-210 a 3-217.

**[8]** National Semiconductor 1981, "Logic Databook", pags. 2-29

**[9]** National Semiconductor 1978, "Data Acquisition Handbook", pags. 2-29

**[10]** National Semiconductor 1984, "Data Conversion / Acquisition Databook", pags. 5-66, 5-76.

**[11]** National Semiconductor 1978, "Linear Databook", pags. 2-11

**[12]** J. C. Marchais, "El amplificador operacional y sus aplicaciones", Marcombo Boixareu Editores, pag. 78- 85. 1976.

**[13]** Motorola Inc. "Thyristor Device Data", Serie C 3rd printing DL 137 Rev. 3., 1989.

**[14]** Lilen H 1973 Thiristors et Triacs; seconde edition Traducción "Tiristores y Triacs", (Marcombo; Barcelona), 1976.

## CONTENIDO

TEMA	PAGINA
1. TEORIA	5
1.1 PROCEDIMIENTO DE SINTONIA	5
1.1.1 Introducción	6
1.1.2 Definición	6
1.2 EXISTENCIA DE UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA	10
1.2.1 Teorema I	10
1.2.2 Teorema II	10
1.3 ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR	10
2. SIMULACIÓN DEL HORNO	12
3. SISTEMA DE CONTROL	16
3.1 PROGRAMA CONTROL HORNO	16
3.1.1 Lenguaje de la maquina	17
3.1.2 Estructura	17
3.2 PROGRAMA EN BASIC	18
4. HARDWARE	23
4.1 TARJETA INTERFASE DEL MICROCOMPUTADOR	23
4.2 TARJETA INTERFASE DE VIA's	23
4.2.1 Introducción	24
4.3 TARJETA ANALOGA / DIGITAL	25
4.4 TARJETA DE ENTRADA ANALOGA	26
4.5 TARJETA CIRCUITO DETECTOR DE PASO POR CERO	29
4.6 ETAPA DE SALIDA DE POTENCIA	31
4.6.1 Tiristor o SCR (Silicon Controlled Rectifier)	31
4.6.1.1 Características generales del Tiristor	33
4.6.1.2 Características estáticas del Tiristor	33
4.6.1.3 Características de control	34
4.6.2 Triac	35
4.6.3 Tarjeta salida potencia	36
4.6.3.1 Disparo de SCR's	37
4.6.3.2 Cálculos	37
5. CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA	
CONTENIDO	
ANEXOS	
MATERIAL	

## LISTA DE FIGURAS

TEMA	PAGINA
Figura 1. Horno a controlar	V
Figura 2. Corte esquemático del Horno	VI
Tabla 1. Datos temperaturas zonas Horno	13
Figura 3. Respuesta del Horno sin control	13
Tabla 2. Cuadro matriz de ganancia	14
Figura 4. Diagrama controlador resultante	15
Figura 5. Arquitectura del sistema	16
Figura 6. IC's 74LS244 y 74LS245	23
Figura 7. PIA 6522	25
Figura 8. Converter 0816	26
Figura 9. Conexión de Termocuplas al convertidor	26
Figura 10. Amplificador en modo común	27
Figura 11. Circuito sensor de cruce por cero	31
Figura 12. Componentes de un Tiristor	32
Figura 13. Circuito Tiristor y curva característica Voltaje – Corriente	33
Figura 14. Componentes de un Triac	36
Figura 15. Curva característica V – I de un Triac	36
Figura 16. Circuito de potencia	37

## LISTA DE ANEXOS

**Anexo A. Tabla International Rectifier listado de SCR's.**

**Anexo B. Plano Autocad "Acometida Principal" Pagina 1**

**Anexo C. Plano Autocad "Diagrama de Fuerza Motores" Pagina 2**

**Anexo D. Plano Autocad "Diagrama de Fuerza Motores" Pagina 3**

**Anexo E. Plano Autocad "Diagrama de Fuerza Resistencias" Pagina 4**

**Anexo F. Plano Autocad "Diagrama de Control" Pagina 5**

**Anexo G. Plano Autocad "Diagrama de Control" Pagina 6**

**Anexo H. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 7**

**Anexo I. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 8**

**Anexo J. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 9**

**Anexo K. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 10**

**Anexo L. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 11**

**Anexo M. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 12**

**Anexo N. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 13**

**Anexo O. Plano Autocad "Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas" Pagina 14**

**Anexo P. Plano Autocad “Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas” Pagina 15**

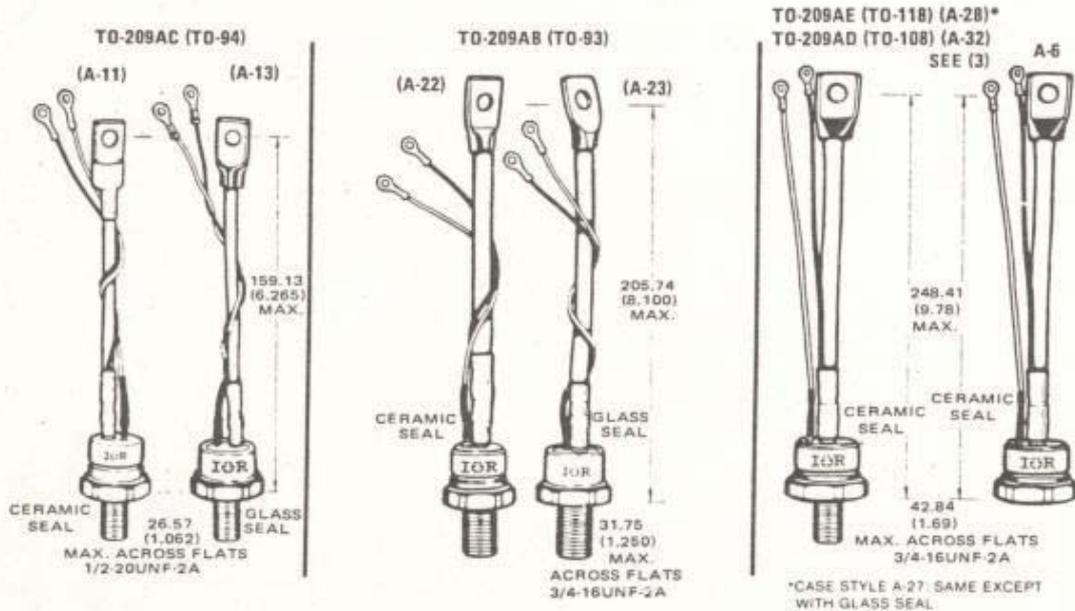
**Anexo Q. Plano Autocad “Distribución de Elementos y Dimensiones Propuestas” Pagina 16**

## ANEXO A

### SCRs — Product Preview — High Power

The semiconductor devices detailed in this DATABOOK represent the International Rectifier product line as of August 1984. As of that date, there were several new products in various stages of development that will be announced and fully documented in the months ahead and prior to the issuance of our next DATABOOK. So that you will be aware of these coming new products, the following brief descriptions have been provided here. Should you have particular interest in any of the devices at any time, feel free to contact the factory for the anticipated announcement date. Provisional specifications are shown below.

#### Stud Mounted — Phase Control SCRs



#### 95 TO 440 AMP $I_{T(AV)}$ SCRs — PHASE CONTROL TYPE — STUD MOUNTED

Series	Current $I_{T(AV)}$ @ $T_C = 85^\circ\text{C}$ (A)	Voltage $V_{RRM}/V_{DRM}$ (V)	Package Designation	Package (1)
S15C	100 - 125	200 - 1200	TO-209AC (TO-94)	1/2"-20UNF-2A/M12
S18C	85 - 125	200 - 1600	TO-209AC (TO-94)	1/2"-20UNF-2A/M12
S23D	175 - 250	200 - 2000	TO-209AB (TO-93)	3/4"-16UNF-2A/M16
S30D	255 - 340	200 - 2000	TO-209AE (TO-118)	3/4"-16UNF-2A
S34D	330 - 440	200 - 2000	TO-209AE (TO-118)	3/4"-16UNF-2A

#### HIGH TEMPERATURE SERIES (2)

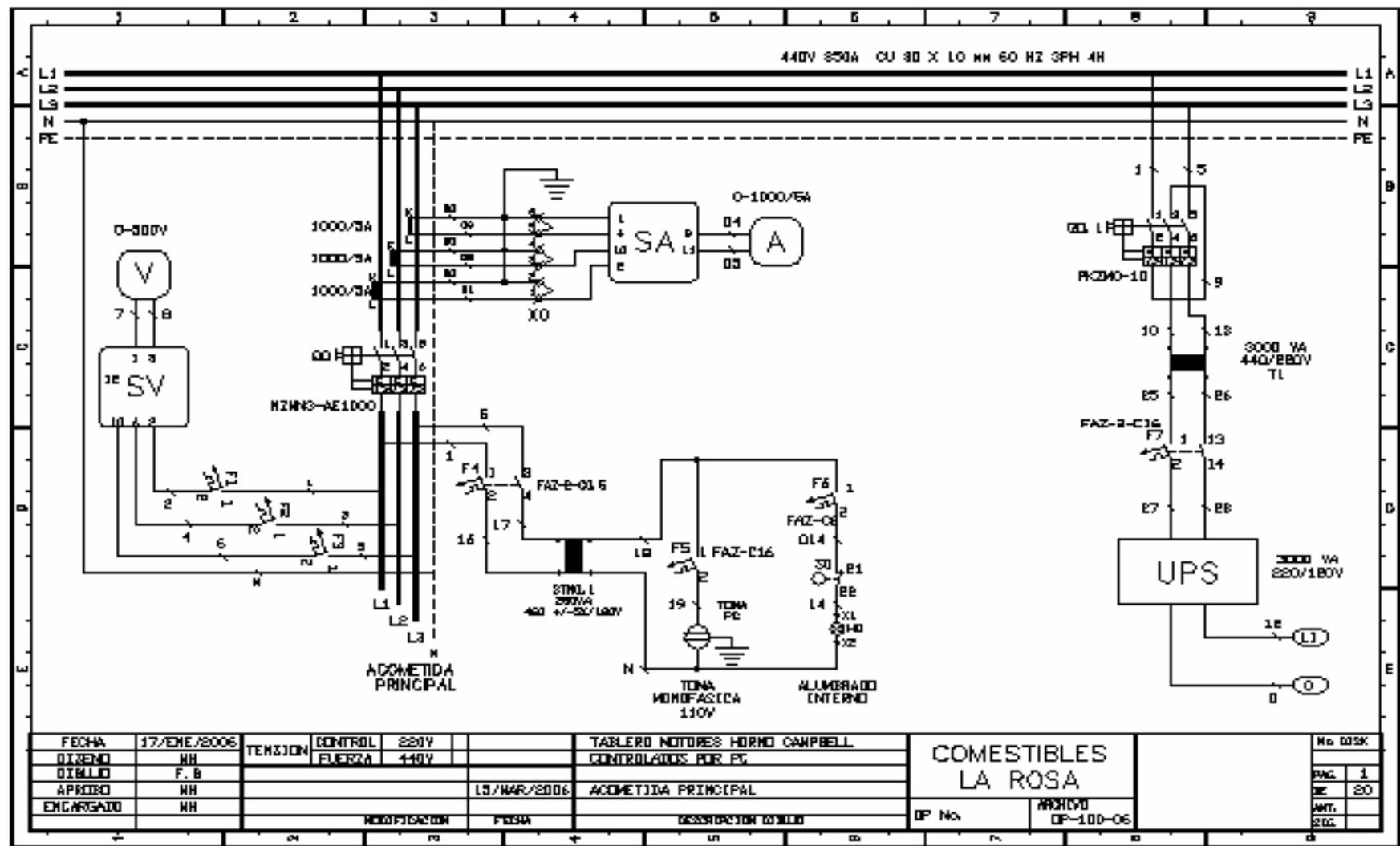
S15CH	110 - 125	200 - 800	TO-209AC (TO-94)	1/2"-20UNF-2A/M12
S18CH	110 - 125	200 - 800	TO-209AC (TO-94)	1/2"-20UNF-2A/M12
S23DH	225 - 250	200 - 800	TO-209AB (TO-93)	3/4"-16UNF-2A/M16
S30DH	320 - 340	200 - 800	TO-209AE (TO-118)	3/4"-16UNF-2A
S34DH	420 - 440	200 - 800	TO-209AE (TO-118)	3/4"-16UNF-2A

(1) Other packages available.

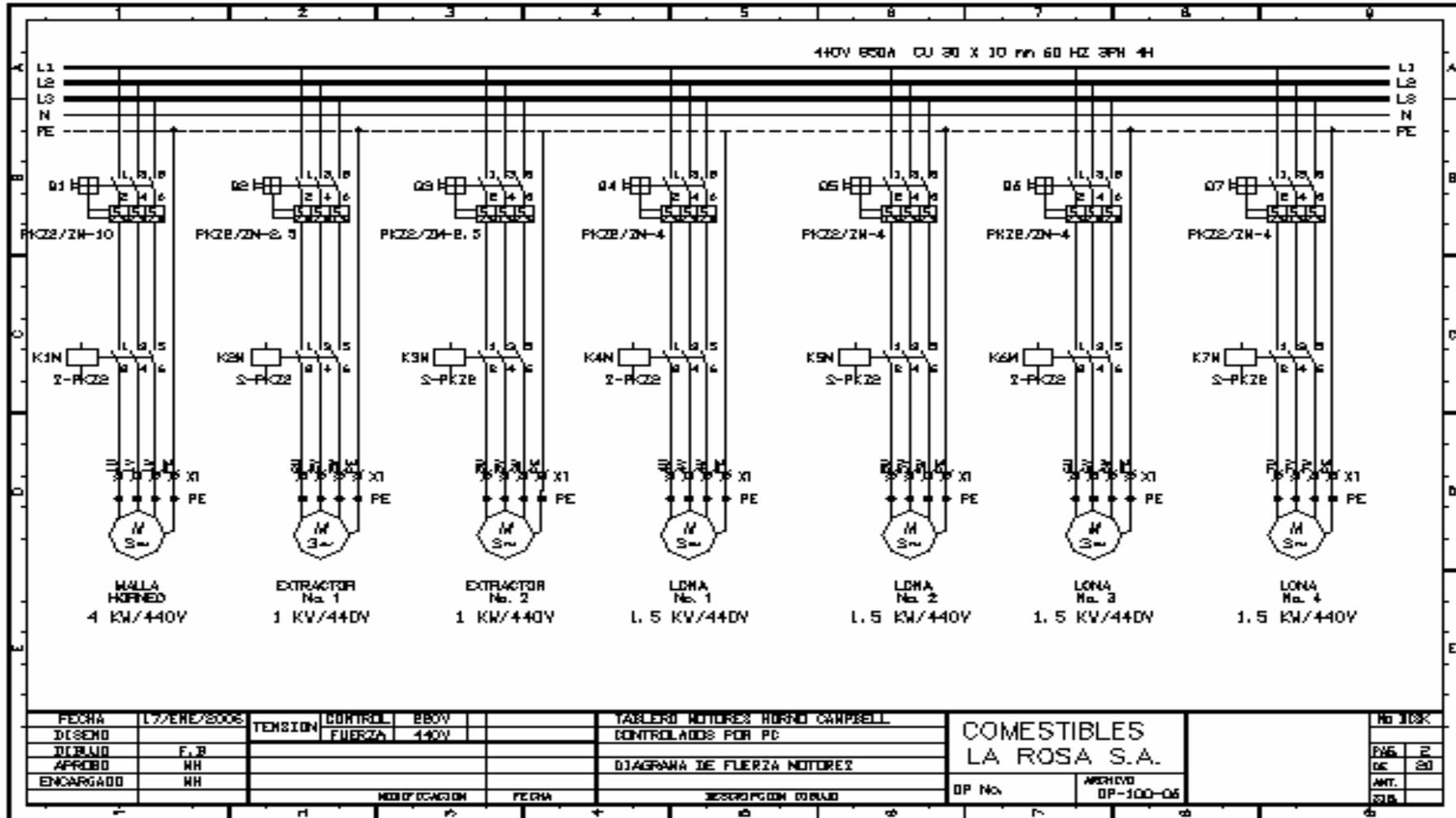
(2) Maximum  $T_j = 150^\circ\text{C}$ .

(3) Similar to TO-209AE but with 1-12UNF-2A threaded stud.

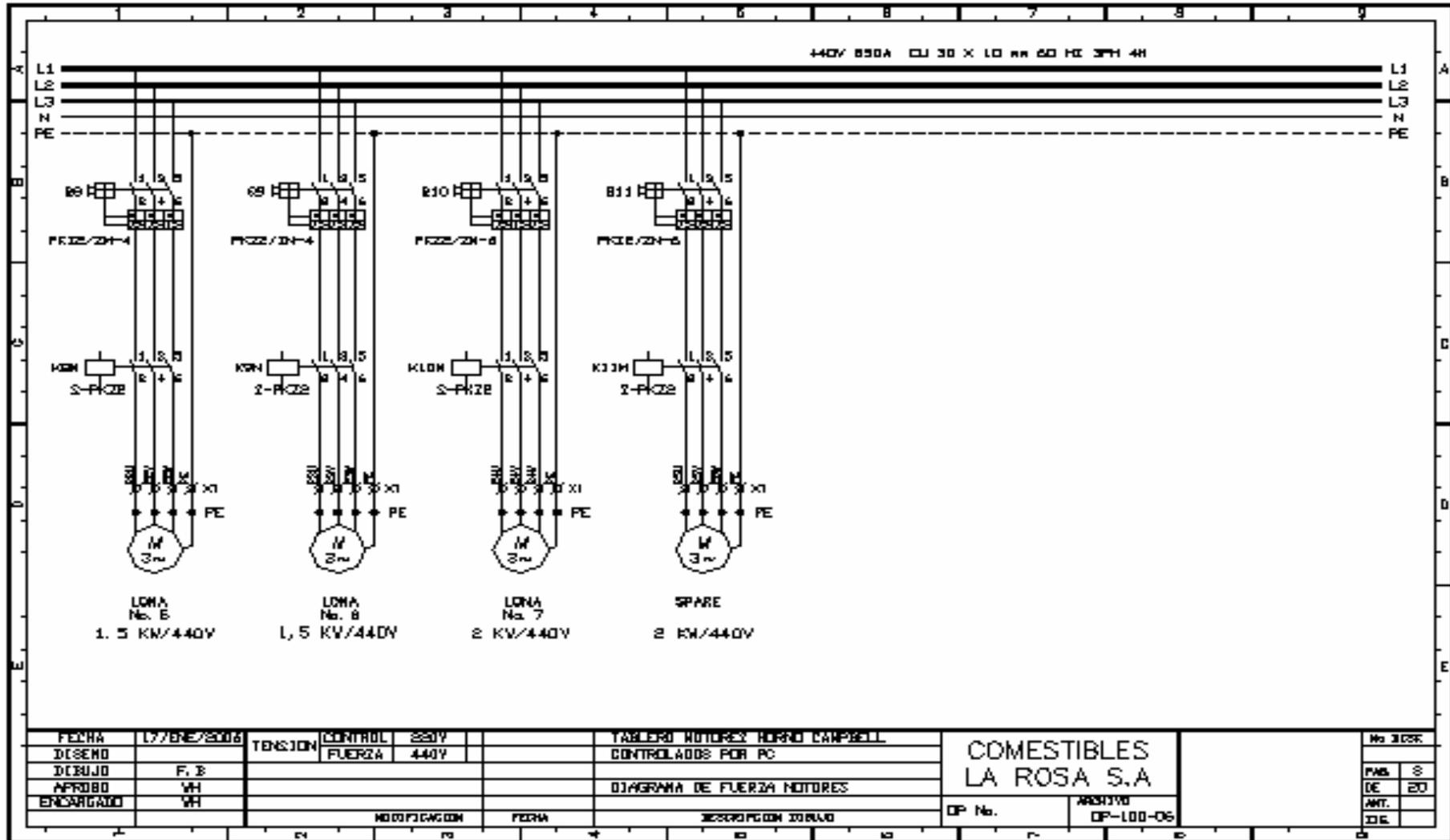
## ANEXO B



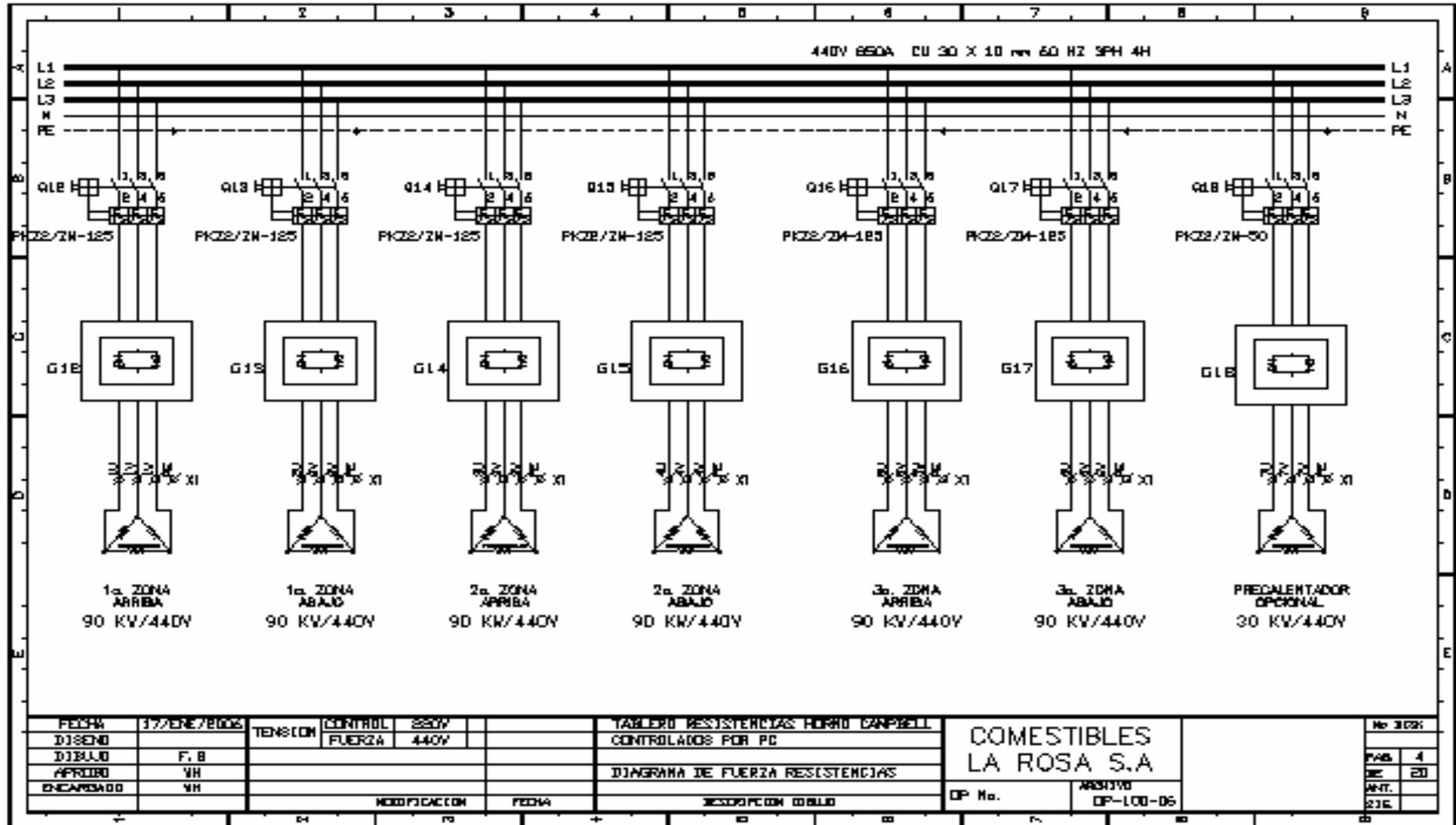
# ANEXO C



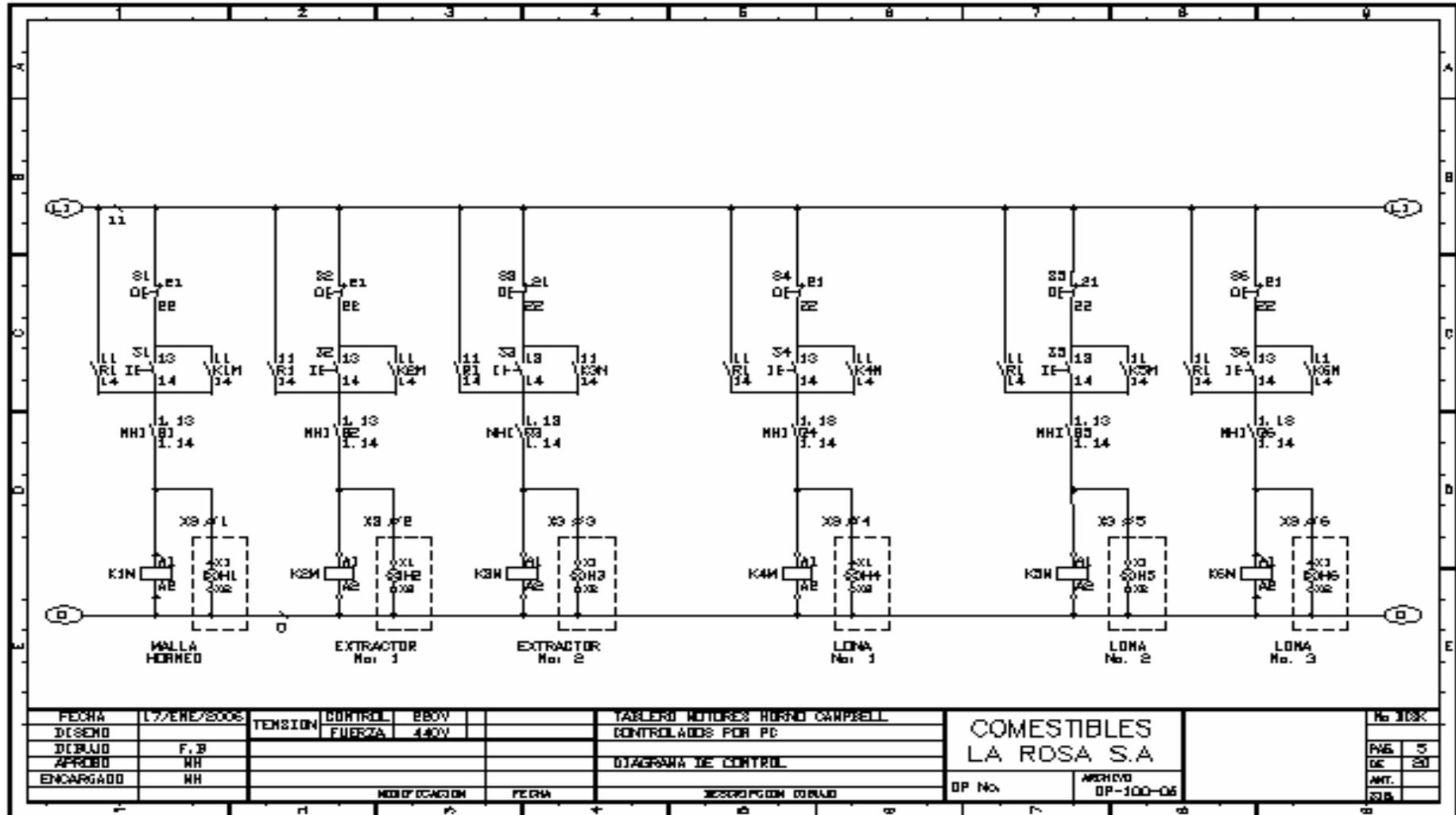
## ANEXO D



## ANEXO E

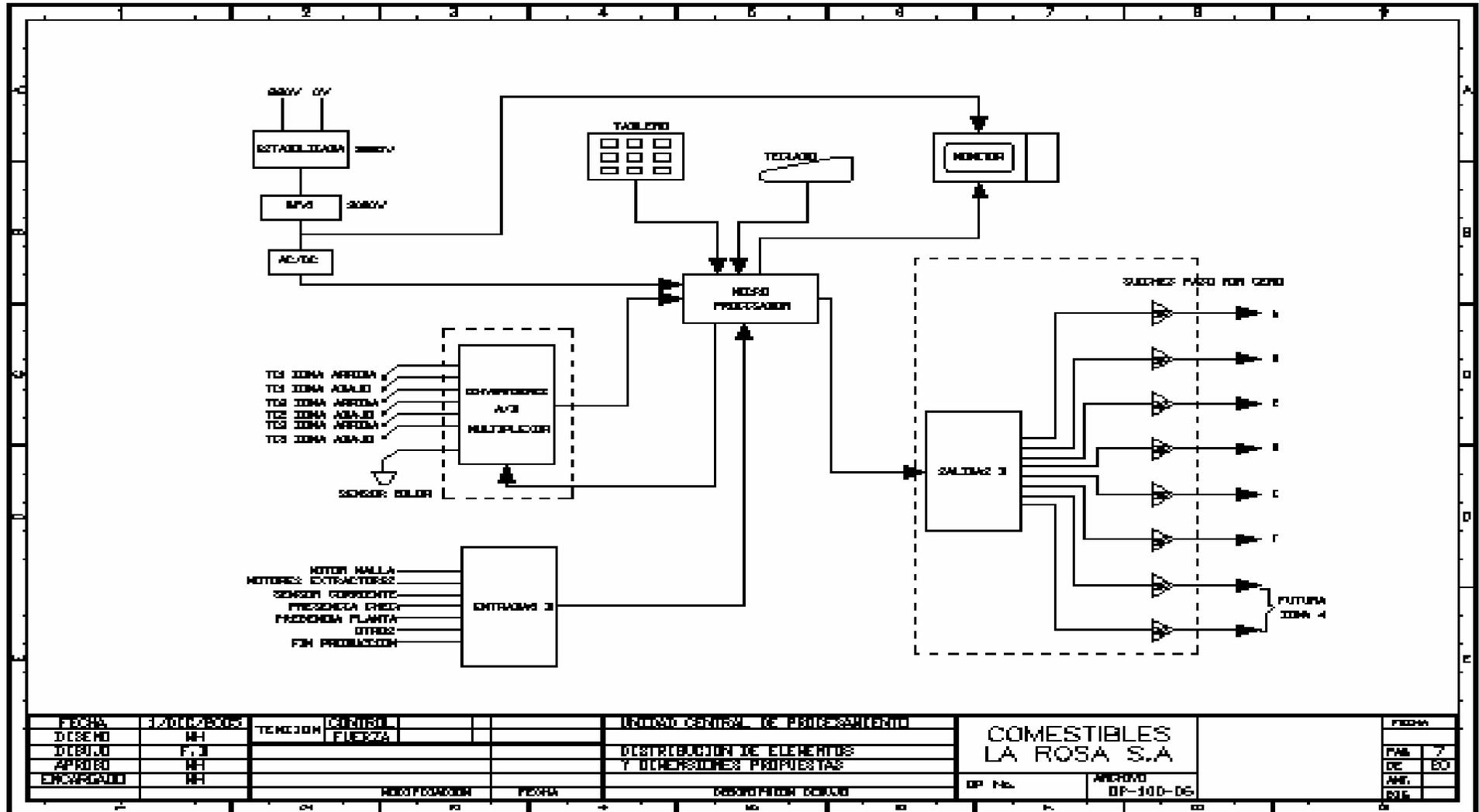


## ANEXO F



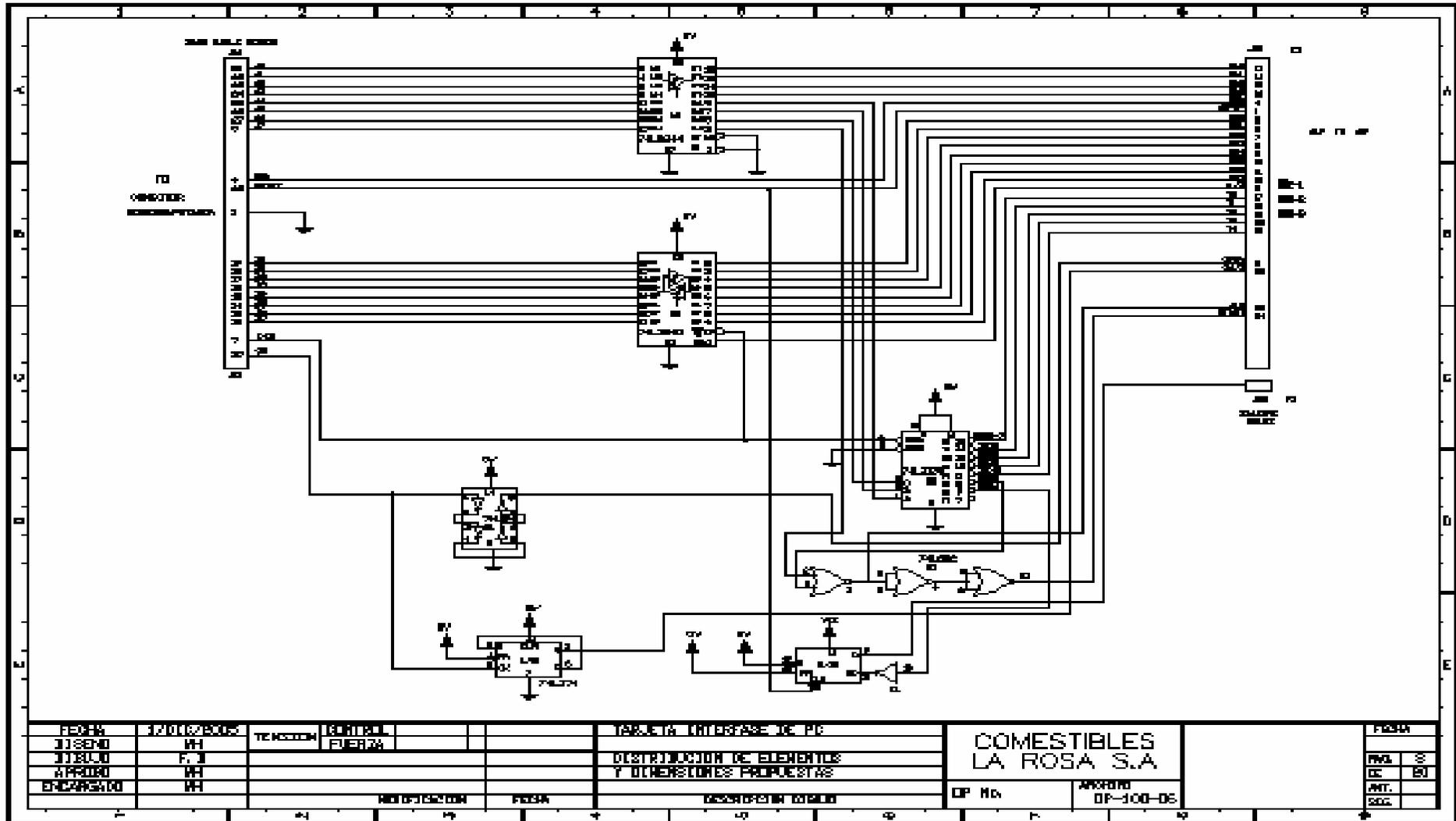


# ANEXO H



FECHA	1/2000/2000	TECNOLOGIA	CONTROL	UNIDAD CONTROL DE PRODUCCION	COMESTIBLES LA ROSA S.A	PROYECTO
DISEÑO	MH		ELECTRICA			
DEBIDO	F.J			DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y DIMENSIONES PROPUESAS		PAE 7
APROBADO	MH					DE 80
ENCARGADO	MH					ANT.
						EST.

# ANEXO I



FECHA	12/06/2005
DISEÑO	WH
REVISIÓN	F. J.
APROBADO	WH
ENCARGADO	WH

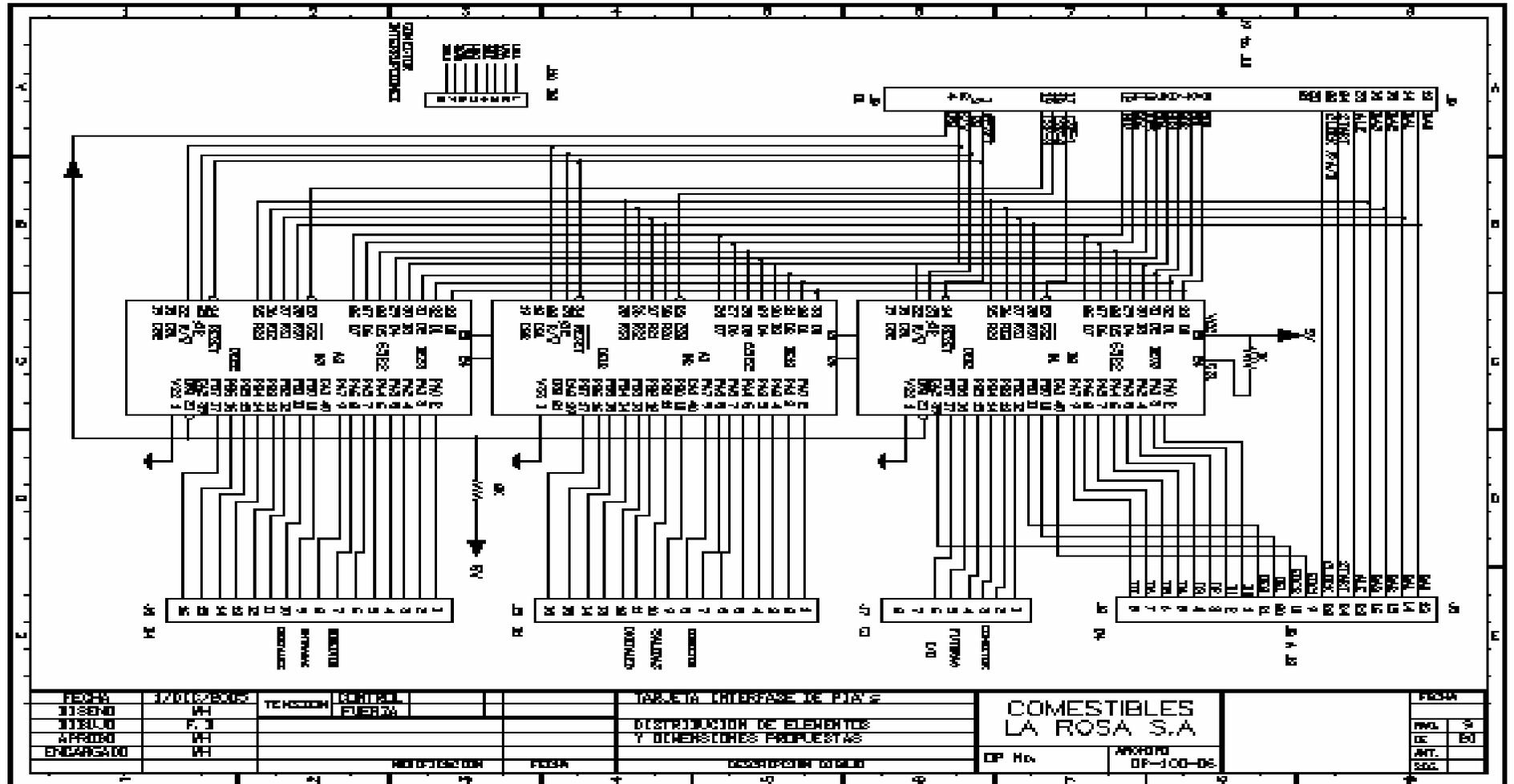
TE. ACCION	CONTROL		
	ENERGIA		

TABLA CRIBRASE DE PC	
DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y DIMENSIONES PROPUESTAS	

COMESTIBLES LA ROSA S.A	
OP. No.	ARCHIVO 0F-100-05

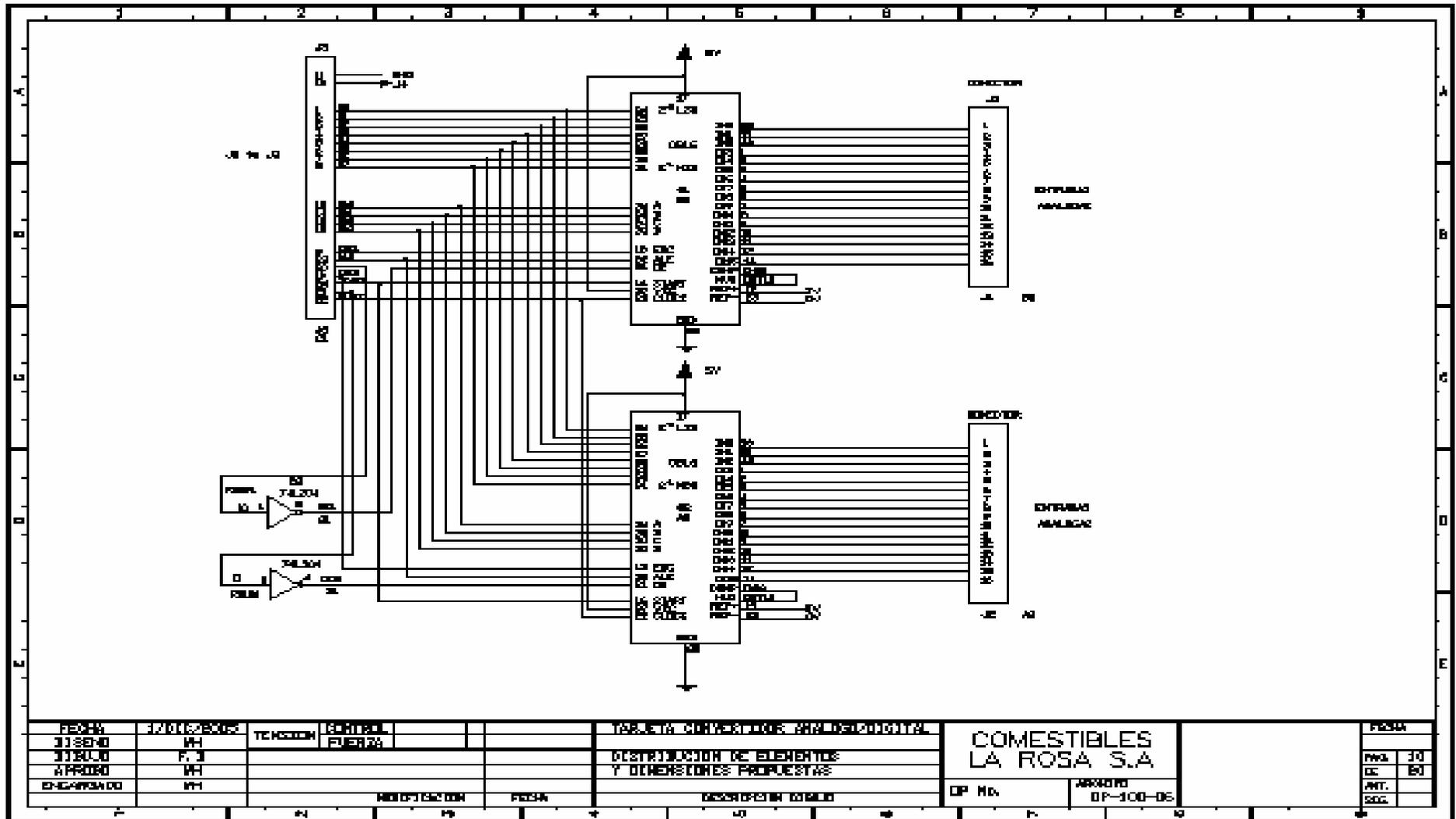
FOLIOS	
FOLIO	8
DE	80
ANT.	
SEC.	

# ANEXO J



FECHA	12/06/2005	TENSION	CONTROL	TABLERA TRIFASADA DE PLATE		COMESTIBLES LA ROSA S.A	PROSA
DISEÑO	MH		ENERGIA	DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y OBTENCIONES PROPUESTAS			
APROBADO	MH					OP. No.	ANT. 01
ENCARGADO	MH					PROYECTO DP-100-06	SEC. 01

# ANEXO K

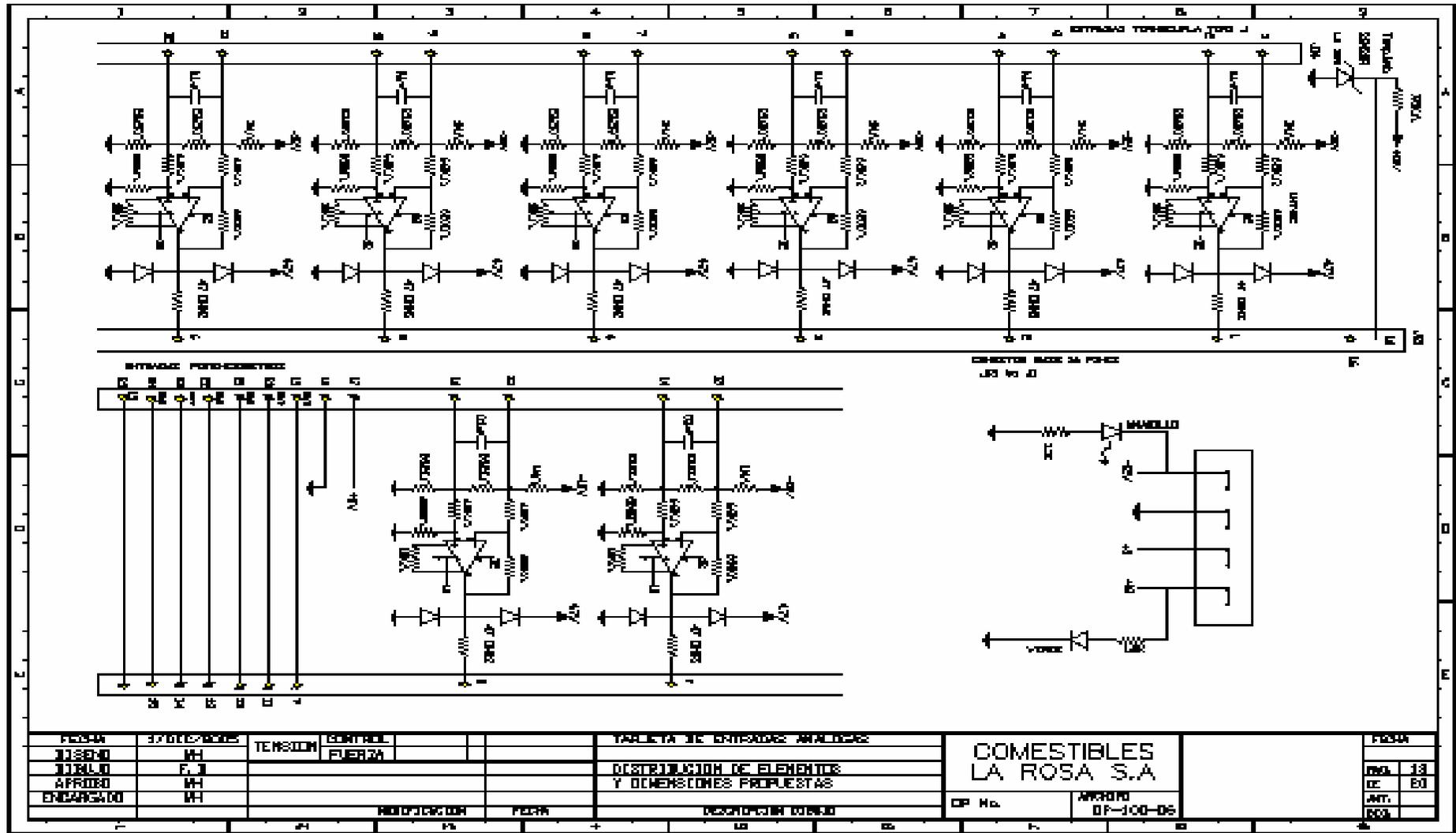


PROYECTO	120062006	TECNOLOGIA	CONTROL FUERZA	TABLA CONVERSION DE UNIDADES	COMESTIBLES LA ROSA S.A	OP. N.º	ANEXO DP-100-06	FOLIO	
DESIGNADO	MH			DISTRIBUCION DE ELEMENTOS Y DIMENSIONES PROPUESTAS				PAG.	30
APROBADO	MH				DE	50			
REVISADO	MH								





# ANEXO N



<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">FUSION</td> <td style="width: 50%;">MH</td> </tr> <tr> <td>RELENO</td> <td>MH</td> </tr> <tr> <td>RELENO</td> <td>MH</td> </tr> <tr> <td>APROBO</td> <td>MH</td> </tr> <tr> <td>ENSAYADO</td> <td>MH</td> </tr> </table>	FUSION	MH	RELENO	MH	RELENO	MH	APROBO	MH	ENSAYADO	MH	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">TENSION</td> <td style="width: 50%;">CONTROL</td> </tr> <tr> <td></td> <td>FUERZA</td> </tr> </table>	TENSION	CONTROL		FUERZA	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">TABLA DE ENTRADAS ANALOGAS</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>DISTRIBUCION DE ELEMENTOS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y DIMENSIONES PROPUESTAS</td> <td></td> </tr> </table>	TABLA DE ENTRADAS ANALOGAS		DISTRIBUCION DE ELEMENTOS		Y DIMENSIONES PROPUESTAS		<p><b>COMESTIBLES</b> <b>LA ROSA S.A.</b></p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">FUSION</td> <td style="width: 50%;">13</td> </tr> <tr> <td>RE</td> <td>E0</td> </tr> <tr> <td>INT.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>RE</td> <td></td> </tr> </table>	FUSION	13	RE	E0	INT.		RE	
FUSION	MH																															
RELENO	MH																															
RELENO	MH																															
APROBO	MH																															
ENSAYADO	MH																															
TENSION	CONTROL																															
	FUERZA																															
TABLA DE ENTRADAS ANALOGAS																																
DISTRIBUCION DE ELEMENTOS																																
Y DIMENSIONES PROPUESTAS																																
FUSION	13																															
RE	E0																															
INT.																																
RE																																
REPARTICION	FUSION	DESCRIPCION DEBIDA	OP. No.	ANEXO DF-100-05																												





