

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Cooperativa de Caficultores de Dota R.L.**

**COOPEDOTA R.L.**

**“Diseño de un prototipo para un sistema de control  
del secado del café en las guardiolas”**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el Grado de Bachiller en  
Ingeniería Electrónica**

**Claudio Ureña Ureña**

**Cartago, 2000**

## **DEDICATORIA**

*A mi madre...*

*Gracias por cuidar mis pasos*

*y guiar mis pensamientos,*

*aunque estés en el cielo.*

*Mis triunfos, también son tuyos.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco el apoyo y la colaboración brindada durante la realización del proyecto al señor Roberto Mata Gerente General de Coopedota R.L. y a los Ing. Paulo Rojas y Guillermo Rojas y a mi profesor el Ing. Luis Paulino Méndez.

También agradezco a mi familia el apoyo incondicional que me han brindado a través de mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	9
1.1 Descripción de la empresa	10
1.2 Definición del problema y su importancia	13
1.3 Objetivos	14
<b>Capítulo 2: Antecedentes</b>	16
2.1 Estudio del problema a resolver	17
2.2 Requerimientos de la empresa	17
2.3 Solución propuesta	19
<b>Capítulo 3: Procedimiento metodológico</b>	20
3.1 Análisis del proceso	21
3.2 Definición del hardware a utilizar	23
3.3 Diseño del hardware	26
3.4 Programación del PLC	30
<b>Capítulo 4: Descripción del hardware utilizado</b>	32
<b>Capítulo 5: Descripción del software del sistema</b>	36

<b>Capítulo 6: Análisis y resultados</b>	41
<b>Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones</b>	44
7.1 Conclusiones	45
7.2 Recomendaciones	46
<b>Bibliografía</b>	47

## **APÉNDICES**

### **APÉNDICE A:**

GRÁFICOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD vs TIEMPO DEL PROCESO DE SECADO DE CAFÉ

### **APÉNDICE B:**

DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE HUMEDAD

### **APÉNDICE C:**

INTERFASE GRÁFICA DEL PANEL TÁCTIL TP170A

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Vista superior de la ubicación de las secadoras	13
<b>Figura 3.1</b>	Diagrama de bloques del sistema	25
<b>Figura 3.2</b>	Capacitor cilíndrico	27
<b>Figura 3.3</b>	Configuración monoestable de un temporizador 555	28
<b>Figura 3.4</b>	Amplificador diferencial básico	19
<b>Figura 3.5</b>	Circuito comparador	30
<b>Figura 4.1</b>	Diagrama de la secadora con el equipo	33
<b>Figura 5.1</b>	Diagrama de flujo del segmento OB1	37
<b>Figura 5.2</b>	Diagrama de flujo del sistema en operación	39
<b>Figura C.1</b>	Vista frontal del panel táctil TP170A	60
<b>Figura C.2</b>	Menú general del panel táctil TP170A	61
<b>Figura C.3</b>	Menú de configuración del secado de café	62
<b>Figura C.4</b>	Menú de monitoreo de proceso de secado de café.	63
<b>Figura C.5</b>	Menú de configuración del panel táctil TP170A.	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Resultados obtenidos en la medición de los parámetros	21
------------------	---	----



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Descripción de la empresa**

Coopedota R.L. es una empresa ubicada en la zona de “Los Santos”, específicamente en Santa María, cabecera del cantón de Dota, número 17 de la provincia de San José. Este pueblo se encuentra a 64 Km. al sur de la capital del país.

Es una empresa de mediano tamaño encargada de recibir el café de los 650 socios que posee y beneficiarlo hasta dejarlo en grano de oro, donde toma uno de dos posibles caminos: el primero de ellos es la exportación principalmente a Europa y los Estados Unidos, o bien, se tuesta y muele para venderse con el nombre de Café Quetzal.

Tiene la misión de mejorar las condiciones sociales, económicas, morales y educativas de sus asociados. Para ello desarrolla actividades que se relacionan con la producción, cosecha, industrialización y mercadeo del café y el de sus productos derivados tanto para el mercado interno como externo.

Cuenta con 4 departamentos: administrativo, beneficio, suministros y torrefactora.

El departamento administrativo está encabezado por su Gerente General, el señor Roberto Mata Naranjo que tiene a su cargo 34 empleados permanentemente y 14 temporales que son contratados en el tiempo de recolección del grano, para poder cumplir con las exigencias del proceso. Este departamento además de cumplir con los aspectos administrativos, también se encarga de buscar los mercados internacionales para la venta del producto.

En el departamento de suministros el asociado puede encontrar lo necesario para la asistencia de sus cafetales y demás actividades agrícolas como son insumos, herramientas, asistencia técnica (cuentan con un Ingeniero Agrónomo a tiempo completo para solucionar los diversos problemas que se presentan en las

plantaciones o dar sugerencias para aumentar el rendimiento de las plantas de café). También le ofrecen al asociado materiales de construcción y repuestos para automóviles.

El departamento de torrefactora se encarga del proceso de tostar, moler y empacar el café con el nombre de Café Quetzal. Este departamento se creó principalmente para suplir dos necesidades de la cooperativa: la primera era tener muestras de café puro, procesado en el beneficio para ofrecerlo a visitantes extranjeros que representan compradores potenciales del producto. La segunda necesidad fue abarcar el mercado local que consistía en la Zona de Los Santos, específicamente los cantones de Dota, Tarrazú y León Cortés. La respuesta de los consumidores ha sido favorable y en los últimos meses se logró un contrato con las Panaderías Durán donde ya lo están vendiendo. Con esto esperan abrir el mercado de la zona metropolitana.

El departamento de beneficio, es el encargado de todo el proceso de recepción, chancado, lavado, secado, almacenamiento y empaque del grano de café, tienen una capacidad máxima de procesar 1000 fanegas<sup>1</sup> de café por día.

Este es el departamento donde se realizará el proyecto, específicamente en el área de secado del café.

En este departamento laboran permanentemente 10 personas. No cuentan con un ingeniero a tiempo completo, pero sí tienen técnicos con mucha experiencia como: electricistas, mecánicos, entre otros. El encargado del departamento es el señor Ignacio Badilla.

---

<sup>1</sup> 1 fanega = 20 cajuelas.

1 cajuela es una medida de volumen que consiste en un cubo de aproximadamente 30 cm. de arista.

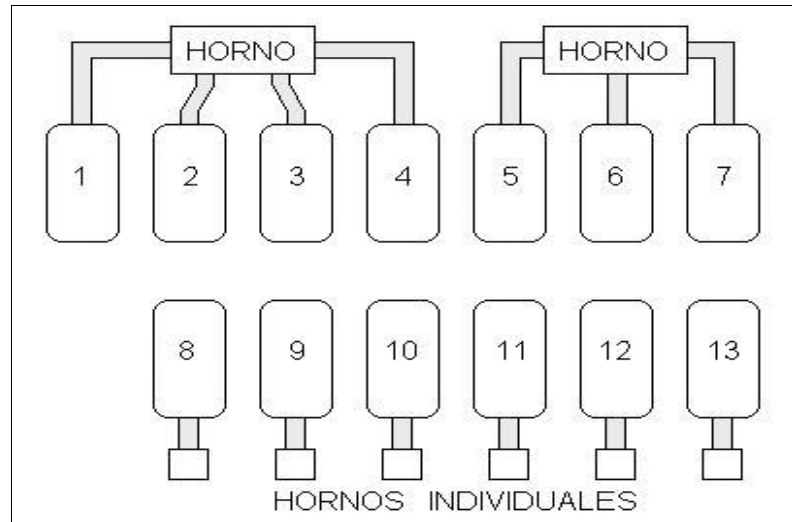
Este departamento es el encargado de recibir el café del productor, posteriormente se chanca: Este proceso consiste en eliminar la cáscara externa del café conocida como broza; después se introduce el grano en unas pilas para lavarlo y quitarle toda la miel, pasando luego a la sección de secado, la cual se divide en dos: la primera es el presecado que consiste en eliminar la mayor cantidad de humedad escurriendo el café, este proceso se basa en la acción de la gravedad, la segunda etapa es el proceso de secado, para lo cual el café se introduce en unos cilindros con la pared perforada llamados “guardiolas”, colocados en forma horizontal y girando a una velocidad de 1 revolución por minuto; a estos cilindros se les aplica calor para llevar el café a la humedad requerida por las especificaciones de calidad.

Una vez concluido este proceso se pasa a la sección de selección que clasifica el café en cuatro categorías para su posterior almacenamiento y empaque.

Para la etapa de secado el beneficio cuenta con trece guardiolas ubicadas como se muestra en la figura 1.1. La alimentación del calor se genera en hornos alimentados con madera (40%) y cáscara de café (60%). Este aire caliente se pasa de los hornos a las guardiolas mediante unos conductos (mostrados en la figura de color gris). La madera es introducida al horno por un operario, mientras que la cáscara de café tiene una válvula gobernada por un sensor de temperatura que se encuentra en la entrada de aire caliente en cada guardiola.

Las guardiolas se encuentran numeradas del 1 al 13 y como se puede observar las cuatro primeras comparten un horno, lo mismo que las 5, 6 y 7; mientras que de la 8 a la 13 poseen hornos individuales.

Esto produce que el prototipo del sistema se instale en una de las secadoras que posea un horno individual, para que la lectura de temperatura no afecte el calor aplicado a otra guardiola con la que comparte el horno, específicamente el prototipo se instalará en la guardiola número 10.



**Figura 1.1** Vista superior de la ubicación de las secadoras

Cada una de estas guardiolas tienen las siguientes dimensiones: 1 metro de diámetro, 5 metros de altura, y se encuentra a una altura de 1.2 metros del suelo hasta el punto más bajo de la guardiola.

## 1.2 Definición del problema y su importancia

El proceso de secado consiste en aplicarle aire caliente a los granos de café que inicialmente se encuentran a una humedad absoluta de aproximadamente 35 grados hasta que lleguen a 12 grados, para esto se necesita un período de 20 horas a una temperatura constante de 40 °C.

Actualmente este proceso finaliza en el momento en que un operario mide la humedad indirectamente y de manera empírica: sacan una pequeña muestra y se analiza la textura del café: color, olor, dureza y sabor.

El medir la humedad de esta forma tiene varios inconvenientes: el primero de ellos es que dependen de la decisión de una persona que posee mucha experiencia que debe estar pendiente constantemente de la evolución del proceso, un pequeño

descuido puede significar un sobresecado o un subsecado, en ambos casos trae consecuencias que representan una disminución de la calidad del café que se ve reflejada en una depreciación del precio del producto.

Otra desventaja es que en la noche no trabajan los encargados del proceso, por lo que se suspende hasta el día siguiente, esto implica una gran pérdida de tiempo y en la mayoría de los casos la humedad del café aumenta por las condiciones atmosféricas que se presentan durante la noche, produciendo que se aumente mucho más el tiempo de secado del café.

Otro detalle importante es que la temperatura se debe de mantener constante en 40 °C, por que las variaciones de temperatura deterioran la calidad del producto final. Para lograr esto se necesita del cuidado por parte del operario de los hornos para que siempre cuenten con la cantidad de leña necesaria para que no aumente ni disminuya de manera significativa la temperatura, considerando que este combustible representa el 40% del total, porque el otro 60% proviene de la cáscara del café.

En resumen, este proceso es muy empírico y no asegura que siempre el café termine con la misma calidad ni humedad porque hay una dependencia directa de las personas responsables que no siempre tienen el debido cuidado, o, no se encuentran disponibles, ya sea por enfermedad o por que el proceso se está terminando a horas en que ellos no trabajan.

### **1.3 Objetivos**

Al realizar este proyecto se cumplió con el objetivo de controlar el proceso de secado de café mediante un sistema capaz de leer los datos de humedad y temperatura sin permitir que lleguen a valores no deseados.

Al no encontrarse un sensor de humedad que se adaptara a las exigencias del proyecto se implementó uno capaz de leer la información y transmitirla para su posterior procesamiento.

Los operarios son capaces de chequear y controlar todo el proceso desde un panel táctil, lo que facilita su operación.

El gerente general puede revisar todo el proceso desde la computadora personal que se encuentra en su oficina, en el momento que así lo desee. De esta forma él se garantiza que el proceso se está desarrollando correctamente.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**



## **2.1 Estudio del problema a resolver**

El principal problema a resolver en el proyecto consiste en eliminar la participación indispensable del operario en el control de la temperatura y humedad del proceso de secado, porque como anteriormente se mencionó, la dependencia directa que existe entre el proceso de control y las decisiones del operario presentan siempre respuestas diferentes, produciendo que el producto terminado sea una mezcla de características heterogéneas en cuanto a la calidad y humedad del producto.

Para lograr esto, es necesario colocar un sensor de humedad en el interior de la guardiola y otro de temperatura para el aire que ingresa a la misma; estos datos son procesados en un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés).

Es importante asegurar que este instrumento de medición de humedad sea lo suficientemente sensible, una diferencia de medio grado en la humedad final tiene muchas repercusiones: si es menor, el café pierde mucho peso, lo que implica una pérdida en las ventas; y si es mayor, es posible que los compradores no acepten el producto porque no cumple con los estándares de calidad.

## **2.2 Requerimientos de la empresa**

La empresa requiere monitorear constantemente los datos de temperatura y humedad, para garantizarse que el proceso de secado del café se desarrolle de la mejor manera.

En este caso se eliminan las variaciones significativas en la temperatura del producto durante el proceso, lo mismo que los resultados heterogéneos de humedad en el momento de almacenar el producto en los silos.

Además, los operarios deben poder utilizar fácilmente el sistema para que puedan seleccionar las características de secado (tipo de secado, temperatura de secado, clase de café) y monitorear en tiempo real el estado del proceso.

También, el gerente general desea tener a disposición los datos de todo el sistema desde su computadora personal, para poder construir una base de datos que le certifique que el proceso se desarrolló correctamente.

La empresa quiere que el proyecto se realice utilizando equipo de Siemens, porque esta empresa les brinda soporte técnico y para que no existan problemas de incompatibilidad con el resto del equipo que posee.

### **2.3 Solución propuesta**

Se desarrolló un sistema capaz de capturar los datos de temperatura y humedad mediante sensores, enviarlos a un Controlador Lógico Programable para su procesamiento y control, y enviar estos resultados mediante una conexión serie vía RS232 a una computadora personal para crear una base de datos.

Además el sistema cuenta con un panel táctil, para que los operarios puedan monitorear todo el proceso de una manera fácil y cómoda; además de seleccionar las diferentes características del proceso al inicio del mismo.

El sistema cuenta con una alarma luminosa para avisar al operario que se está produciendo un problema en el proceso. También esta alarma es activada cuando el proceso llega a su fin, para que el operario tome las acciones correspondientes de desalmacenar el producto y alistar la secadora para la siguiente carga de café.

De esta forma la empresa puede vigilar que el proceso sea eficiente y realizar las correcciones necesarias en caso que se dé alguna señal de alarma.

**CAPÍTULO 3**  
**PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

### 3.1 Análisis del proceso

Para realizar el diseño del prototipo del sistema de control fue necesario primeramente analizar como se comportan las variables de temperatura, humedad, peso y tiempo en el proceso de secado del café para lo cual fue necesario tomar muestras cada 30 minutos, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.1** Resultados obtenidos en la medición de parámetros

HORA	T del café / °C	T del aire / °C	Humedad	Peso / g.
0	21.3	25	51.4	622
½	29.2	60	42.6	622
1	29.8	55	35.7	626
1 ½	30.4	60	32.7	628
2	31.1	60	33.0	604
2 ½	32.1	58	31.9	642
3	31.3	65	33.0	610
3 ½	34.6	65	29.9	618
4	37.1	65	29.1	632
4 ½	37.6	60	28.9	638
5	39.1	60	27.9	628
5 ½	36.3	65	27.7	597
6	36.9	70	27.2	610
6 ½	38.5	70	25.9	594
7	37.8	72	25.4	600
7 ½	38.6	73	23.5	576
8	41.7	70	21.7	580
8 ½	40.3	70	21.2	560
9	40.0	68	20.6	556
9 ½	38.4	70	20.0	566

Continuación...

HORA	T del café / °C	T del aire / °C	Humedad	Peso / g.
10	39.5	70	18.7	560
10 ½	36.9	65	19.2	548
11	38.2	78	17.1	516
11 ½	41.7	75	17.0	510
12	39.9	71	16.9	494
12 ½	40.4	77	15.9	492

Con estos datos se analizó como se comportaban estas variables durante el proceso de secado. La segunda columna representa la temperatura que tiene el producto en el momento de la medición, la tercera es la temperatura del aire caliente que ingresa a la guardiola, la cuarta columna representa la humedad del café<sup>1</sup>, y la quinta representa el peso del café de una muestra constante de 1 litro.

Como se puede observar en los gráficos del apéndice A, tanto la temperatura de la muestra de café (Gráfico 1) como la del aire caliente (Gráfico 2) no muestran un comportamiento muy constante durante la realización del proceso, lo que produce que el producto tenga serias repercusiones en cuanto a su calidad final. Además se puede observar que existe una diferencia de temperaturas de aproximadamente 20 °C entre la temperatura del grano de café y la del aire caliente que ingresa a la secadora, situación muy importante de considerar en el momento de diseñar el programa de control que se encuentra en el PLC.

---

<sup>1</sup> Para este caso la humedad final no alcanzó los 12 grados porque el proceso se estaba terminando a una hora (9:30 p.m.) en que no se encontraba ningún operario trabajando que fuera capaz de darle el punto al café, por lo que fue necesario suspender el proceso cuando se alcanzaba los 16 grados de humedad.

El gráfico 3 muestra como se comporta la humedad durante el proceso, esta si tiene una curva exponencial establecida con un comportamiento descendiente que no presenta ningún problema en su análisis para realizar la rutina de programación.

### **3.2 Definición del hardware a utilizar**

Al inicio del proyecto se decidió que el sistema debería contar como mínimo con un sensor de humedad, uno de temperatura y una unidad de que procesara los datos. Este equipo por solicitud de la empresa debía de ser adquirido en la empresa Siemens, pero al investigar esta empresa no contaba con sensores de humedad que se adaptaran a los requerimientos del proyecto.

Se inició una búsqueda en diferentes empresas en Costa Rica y en el extranjero pero en ningún caso se encontró el dispositivo que supliera las necesidades para el proyecto, por lo que fue necesario el diseño de un prototipo.

Para el resto del equipo se buscó al Ing. Paulo Rojas de Siemens. Junto con el se decidió comprar un PLC de la serie S7 300 con un CPU 312 IFM<sup>1</sup> como unidad de procesamiento de datos.

Los datos de temperatura y humedad deben de ser transmitidos a este dispositivo en lazos de corriente para que no se pierda información.

Pero este PLC solo contaba con 10 entradas digitales y 5 salidas digitales, por lo que fue necesario agregarle un módulo de entradas y salidas analógicas (4

---

<sup>1</sup> Para observar los datos específicos del CPU, referirse al manual de Configuración, instalación y datos de las CPU de la página 8-24 a la página 8-35. Este manual tiene como número de parte el: EWA 4NEB 710 6084-04-01.

entradas y 2 salidas), con una resolución de 1 byte (8 bits). El modelo del módulo es SM334<sup>1</sup>.

Además de este módulo fue necesario adquirir un transmisor de temperatura Sitrans TK-H, para que tomara el dato de la termocupla y lo enviara al PLC en una señal de 4-20mA.

Como el prototipo del sensor de humedad tiene una señal de salida de 0-10v fue necesario comprar un convertidor Sitrans T, para pasar esta señal a 4-20mA.

Para gobernar la temperatura se utilizó un variador de frecuencias para controlar la velocidad del motor del abanico que inyecta el aire caliente a la secadora. Este variador es de la serie Midi Master Vector para una potencia de 7.5 caballos de fuerza (hp, por sus siglas en ingles).

Con el objetivo de que el operario pudiera controlar y monitorear fácilmente el proceso se compró un panel táctil del tipo TP170A. Desde aquí se puede seleccionar las características de secado (punto o cacho)<sup>2</sup>, tipo de café (según su clase: primera, segunda, tercera o cuarta) y la temperatura de secado. Estos datos son transmitidos a una computadora personal mediante comunicación serial. A esta computadora fue necesario agregarle un módulo de comunicaciones CP 5611, el cual se conecta en cualquier puerto serie de la computadora, e instalarle el software Protool Runtime, para que existiera compatibilidad en el protocolo de comunicación que tiene el PLC.

---

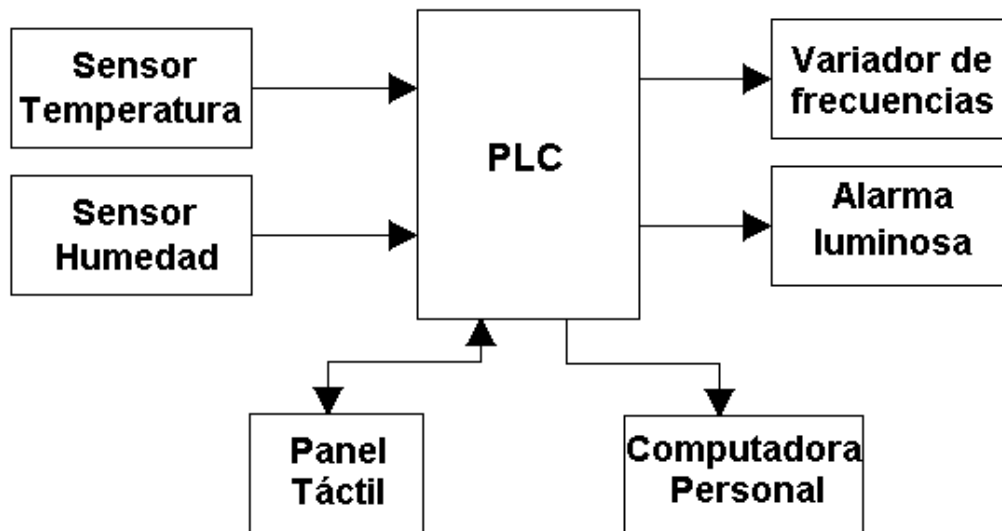
<sup>1</sup> Las especificaciones del módulo se encuentran en el manual de "Datos de los Módulos" en las páginas 4-109 a la 4-114. este manual es el número EWA 4NEB 710 6067-04 01.

<sup>2</sup> En el proceso de secado existen dos tipos: Punto y Cacho. El secado a punto consiste en que se lleva el café hasta la humedad final 12%, mientras que el secado a cacho es un semisecado, o sea, el producto se saca de las secadoras cuando llegan al 18% de humedad. Este tipo se utiliza cuando existe un pico de producción y la maquinaria que existe no es suficiente para finalizar el proceso. Cuando la producción disminuye, el producto vuelve a las secadoras para terminar el proceso.



Por último se compró una alarma luminosa para avisar al operario que se está produciendo algún problema, o bien, que el proceso ya terminó.

En la figura 3.1 se observa el diagrama de bloques del sistema, al conectar todos los componentes antes mencionados.



**Figura 3.1** Diagrama de bloques del sistema.

Con este diagrama de bloque se puede observar que tanto el sensor de humedad como de temperatura solamente son señales de entradas; mientras que la señal hacia el variador de frecuencia, la alarma luminosa y la computadora personal, solo son salidas.

Por otro lado con el panel táctil al ser el dispositivo de interfase entre el sistema y el operario, se convierte en un elemento de entrada/salida<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Las señales de entrada corresponden a la selección de las características del proceso de secado: tipo de secado, temperatura, clase de café. Mientras que las señales de salida son todos los datos de temperatura y humedad que se monitorean desde el panel.

### 3.3 Diseño del hardware

Como primer punto del diseño del hardware fue la implementación del sensor de humedad. Se utilizó el principio del capacitor cilíndrico para medir la humedad del café dentro de la secadora.

La ecuación de dicho capacitor es:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon * L}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

donde:

C: capacitancia

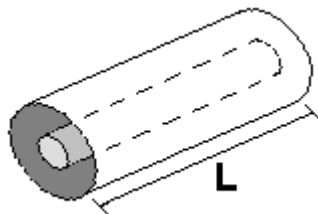
L: longitud del capacitor

$r_1$ : Radio del cilindro interno

$r_2$ : Radio del cilindro externo

$\varepsilon$  : Constante de permitividad, la cual es igual a  $k*\varepsilon_0$ , donde k es la constante del dieléctrico y  $\varepsilon_0$  es la constante de permitividad al vacío ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m).

Como se puede mostrar en la figura 3.2 el capacitor cilíndrico esta constituido por dos tubos metálicos de una longitud de 60 cm y un radio de 8.8cm el externo y 0.85 cm el interno.



**Figura 3.2** Capacitor cilíndrico.

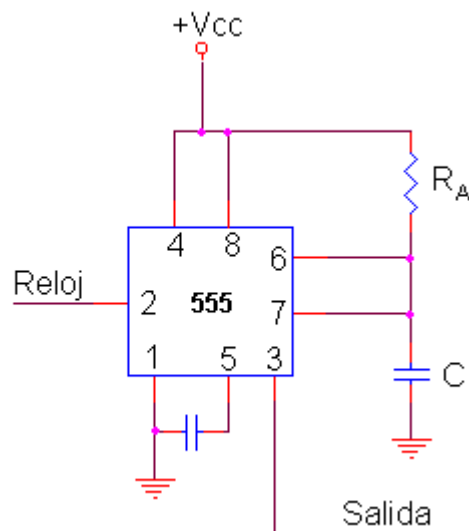
El café se obliga a pasar por el centro de los dos radios convirtiéndose en el dieléctrico del capacitor afectando la constante “k”, por lo que a mayor humedad del café mayor es el valor de “k”, de manera que la capacitancia aumenta.

Mientras el café se seca, estos cilindros se convierten en un capacitor variable donde su valor oscila entre 30pF y 250pF.

Este capacitor se conecta a un circuito integrado temporizador (555) en configuración monoestable o de un disparo, donde al presentarse un flanco negativo en la patilla 2 (disparo), la salida pasa a alto en la terminal 3 durante un tiempo definido por la ecuación:

$$T_{\text{alto}} = 1.1R_A * C$$

En la figura 3.3 se puede observar como se conecta un temporizador en la configuración de monoestable.



**Figura 3.3** Configuración monoestable de un temporizador 555.

Una vez obtenido este tiempo en alto la señal se pasa por un filtro pasivo tipo  $\pi$ , para eliminar todo tipo de rizado y transformar la señal a corriente directa o CD.

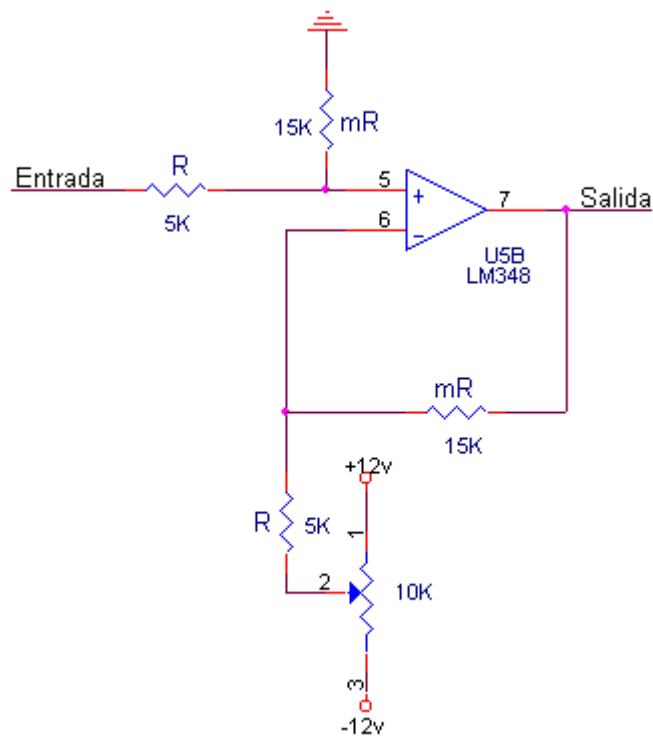
Esta señal de CD es desacoplada por un circuito integrado del tipo LM348, donde el primer amplificador operacional está conectado en la configuración de seguidor de voltaje.

El segundo amplificador operacional de este circuito integrado se encuentra alambrado como amplificador diferencial básico. Con esta conexión se pretende que la medición de humedad tenga una señal de salida de 0-10v.

Como se puede observar en la figura 3.4, en la configuración existen 4 resistencias y 1 potenciómetro. Dos resistencias son de valor "R" y 2 son de valor "mR", esto es porque con esta distribución la ganancia se puede expresar con la siguiente expresión:

$$V_o = mE_1 - mE_2 = m(E_1 - E_2)$$

donde  $E_1$  es el voltaje que se aplica en la entrada no inversora y  $E_2$  es el voltaje aplicado a la entrada inversora.



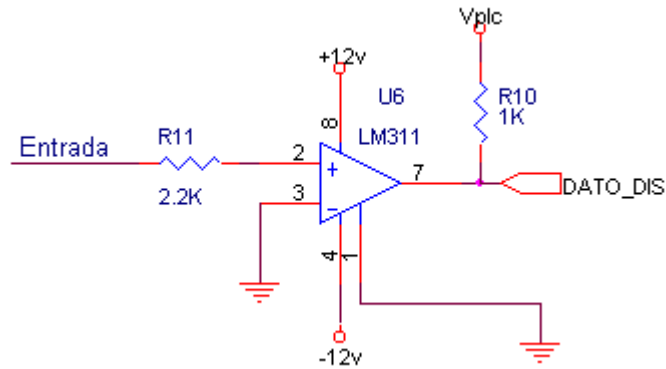
**Figura 3.4** Amplificador diferencial básico

Con el potenciómetro se logra eliminar cualquier nivel de voltaje en corriente directa (offset) que se genera en etapas anteriores al amplificador diferencial básico.

La última etapa del circuito medidor de humedad es la que indica el dato disponible. Esto es porque como no existe conexión permanente entre el capacitor y el circuito, por motivo de que el primero se encuentra dentro de la secadora la cual se mantiene girando constantemente, solo en un tiempo de 5 segundos por minuto, el PLC tiene que capturar el dato para su procesamiento. Por lo que al circuito se le agregó esta etapa que se puede observar en la figura 3.5.

Para esta etapa se utilizó un circuito integrado LM311, el cual es un comparador. Se utilizó este por tener la característica de ser de colector abierto, esto porque la polarización positiva del circuito (+12v) no se ajusta al voltaje mínimo para el 1 lógico del PLC (+15v). Con el LM311 se puede utilizar un voltaje externo al

circuito para indicar el 1 lógico en este caso se tomo el voltaje de alimentación del mismo PLC (+24v).



**Figura 3.5** Circuito comparador

La entrada al comparador es el valor de salida del circuito y se compara con 0 voltios porque cuando el capacitor no realiza contacto con el circuito, el voltaje de salida es menor a cero voltios ( $V_o < 0v$ ).

El esquemático completo de este circuito se puede observar en el apéndice B.

### 3.4 Programación del PLC

El controlador lógico programable (PLC) se programa en un software llamado Step 7 producido por la empresa Siemens, el set de instrucciones completo se puede encontrar en el "Manual de programación de bloques (232)", en el anexo A (páginas A-2 a la A-11).

Para programar los PLC, Siemens ofrece dos estructuras: la primera es la denominada como programación en escalera (KOP), esta es la más típica; mientras que la otra es conocida como Lista de Instrucciones (AWL). En esta segunda la sintaxis de las instrucciones es similar a las utilizadas por cualquier ensamblador de microcontroladores o microprocesadores.

Para la programación del PLC se hicieron varias rutinas como son:

- a. Toma de datos desde puerto analógico
- b. Filtro de datos
- c. Revisión de hilo roto
- d. Salida de información por puerto analógico
- e. Alarmas

Una vez realizadas estas subrutinas se unieron en un programa principal, que las llamaba cada vez que fuera necesario.

Cuando se comprobó que el programa se estaba ejecutando correctamente se agregó los mensajes y el protocolo de comunicación con el panel táctil y la computadora personal.

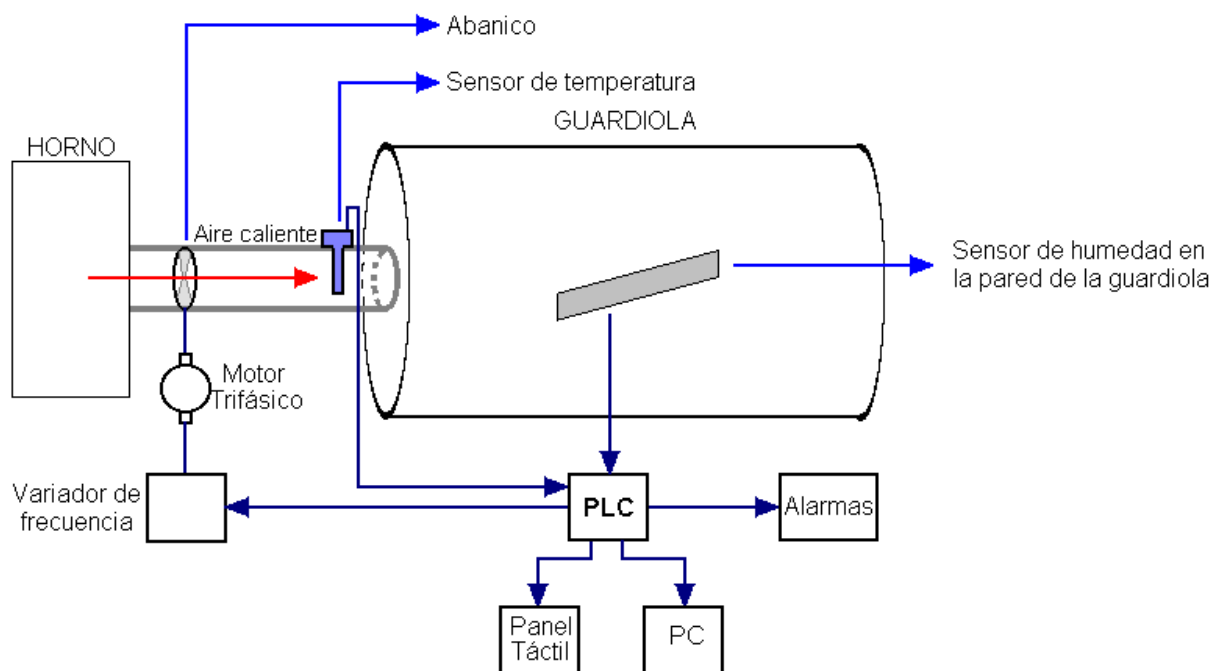
# **CAPÍTULO 4**

## **DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO**



En este capítulo se detallan los dispositivos utilizados en la elaboración de este proyecto, estos fueron seleccionados basándose en los criterios explicados en el capítulo 3 de este documento.

En la figura 4.1 se observa como queda la estructura de la guardiola con el equipo instalada en ella.



**Figura 4.1** Diagrama de la secadora con el equipo

Como se mencionó anteriormente la CPU es de la serie S7 300, específicamente es el 312 IFM. Tiene la característica de tener integrado 10 entradas y 5 salidas digitales. Pueden reconocer impulsos de una duración de 10 a 50 $\mu$ s aproximadamente, con una intensidad de 2 a 6.5mA. Tiene una memoria RAM de 20 Kbytes y una memoria EEPROM también de 20 Kbytes.

Para programar esta CPU se utiliza en software Step 7 en cual tiene una gran cantidad de instrucciones desde operaciones binarias hasta con números con coma flotante.

A este CPU se le pueden agregar diferentes tipos de módulos digitales o analógicos, dependiendo de los requerimientos del sistema a diseñar, hasta un máximo de 256 canales digitales, y 64 entradas y 32 salidas analógicas. Los módulos analógicos pueden operar tanto con voltaje (0-10V) como con corriente (4-20mA).

Cuenta con funciones integradas como contadores, frecuencímetro y reloj, pero para el sistema diseñado no se utilizó ninguno.

La alimentación es de 24v, la cual se obtiene de una fuente por lo que para los canales digitales la señal de "0" se encuentra en un rango de -3 a 5v, mientras que el "1" se obtiene con un voltaje de 15 a 30v.

Las especificaciones de la CPU se pueden observar en el Manual "Configuración, instalación y datos de las CPU" (páginas 8-24 a 8-35).

El módulo analógico es el SM334 que tiene 4 entradas y 2 salidas, tiene una resolución de 8 bits, y se puede seleccionar libremente si se utiliza el voltaje o la corriente como elemento de medida o salida, porque este módulo tiene previsto ambas terminales. No es parametrizable y sus datos específicos se pueden encontrar en el manual "Datos de los módulos", en el capítulo 4.

Cuenta con un enlace galvánico con la CPU, pero una separación galvánica con relación a la tensión de carga. Tiene una resistencia de entrada de 100K $\Omega$  para la tensión y de 50 $\Omega$  para la intensidad.

Para el sensor de temperatura se usó como actuador una RTD, elemento que tiene una resistencia variable con el calor.

Esta RTD se conecta a un transmisor de temperatura Sitrans TK-H. Este elemento tiene la característica de ser parametrizable, lo que indica que desde un software llamado "Simatic PDM" (The Process Device Manager) se pueden seleccionar entre otras cosas como es el actuador que tiene conectado si de 2, 3 ó 4 cables, si es una termocupla, una RTD, una resistencia térmica, y como es la señal de salida.

La interfase de parametrización entre el Sitrans TK-H y la PC se realiza con un hard módem. Las especificaciones de este dispositivo se pueden observar en el catálogo FI-2000 de Instrumentos de Campo para procesos de automatización, de la página 2-42 a la 2-44.

Como la salida del sensor de humedad es una señal de 0-10v se utilizó el convertidor a corriente Sitrans T. Este es otro dispositivo parametrizable que se puede utilizar para convertir voltaje a corriente o viceversa. Los rangos de la entrada y salida se pueden variar, por ejemplo se puede tener una entrada de 0 a 1v y convertirla a 4 a 20mA. Para el sistema se seleccionó la entrada de 0 a 10v y la salida de 4 a 20mA. Las especificaciones del Sitrans T están incluidas en el manual que adquiere con la compra del transmisor universal.

Para controlar la temperatura se utilizó un variador de frecuencia de la familia de los Midi Master Vector. Con el se logra controlar la velocidad de giro del abanico que inyecta el aire caliente a las secadoras. Si la temperatura desciende se aumenta la velocidad del abanico para que compense y viceversa.

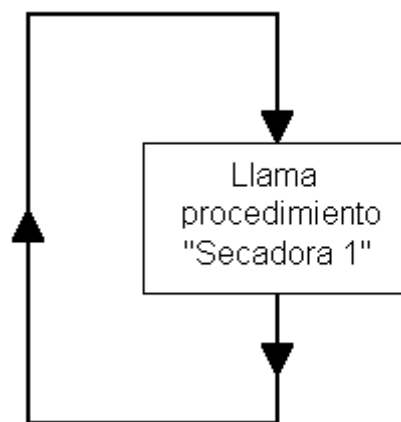
Este variador es para un motor de 7.5 hp y 240v trifásico, estos datos son importantes en el momento de seleccionar un variador porque dependiendo de ellos es el tamaño del variador. Con la compra de este Midi Master Vector, se incluye un manual de instrucciones de funcionamiento en donde se encuentra incluida las especificaciones.

# **CAPÍTULO 5**

## **DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL SISTEMA**

La primera característica del Step 7 es que el bloque principal es cíclico, o sea, siempre se está ejecutando mientras el PLC se encuentre encendido y en modo ejecutar (Run).

Este bloque principal ha sido diseñado dejando previsto la inclusión en el sistema de más sistemas que controlan secadoras, por lo que su diagrama de bloques es muy sencillo como se puede observar en la figura 5.1



**Figura 5.1** Diagrama de flujo del segmento OB1

Este diagrama de bloque es del segmento llamado “bloque de organización”. Cuando se agregen las demás secadoras al proyecto el bloque se ampliará con segmentos iguales pero el número de la secadora se incrementará.

En el procedimiento llamado “Secadora 1” es donde se encuentra todo el desarrollo del programa como se puede observar en la figura 5.2.

El procedimiento inicia con una consulta si la secadora se encuentra encendida o apagada. Si la elección es la segunda no ejecuta nada del procedimiento.

Una vez que está ejecutando el procedimiento la primera consulta que realiza es por el tipo de secado que se hace, si es punto, le asigna a una variable el valor de

12 y si es cacho se le asigna 18. Este dato se utiliza para compararlo con el de la humedad del café para darse cuenta en que momento se debe detener el proceso.

Después se realiza la medición de temperatura, pero antes el sistema revisa que no exista un problema de hilo roto en este puerto. Este dato es importante para generar la salida analógica que está conectada al variador de frecuencia que controla el motor del abanico que inyecta el aire caliente a la guardiola. Si el sistema genera la señal de que hay hilo roto, el sistema genera una señal de alarma para que el operario resuelva el problema lo más antes posible.

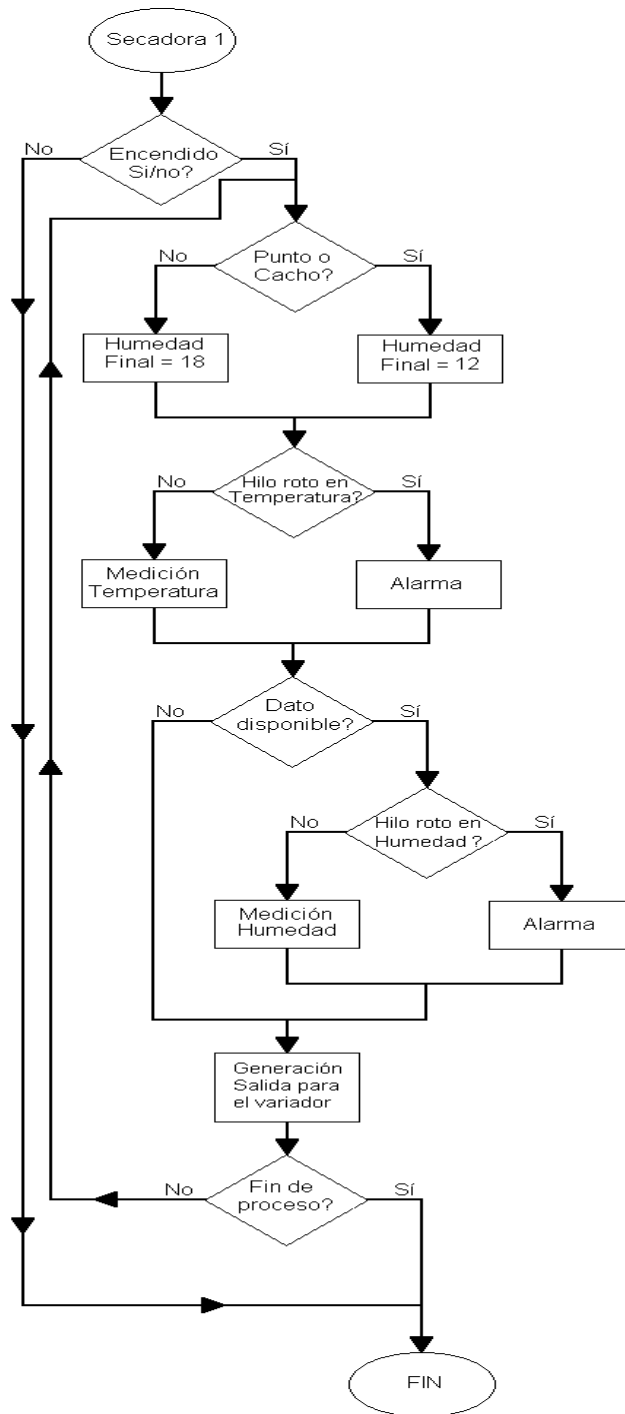


Figura 5.2 Diagrama de flujo del sistema en operación

El proceso para el dato de humedad es prácticamente igual, con la diferencia de que como el sensor de humedad no siempre está transmitiendo por las situaciones antes expuestas, el sistema primero revisa si hay dato disponible. El dato obtenido en esta etapa es comparado con el generado anteriormente (18 ó 12) para ver en que momento se debe de terminar el proceso.

El paso siguiente es generar la salida para el variador de frecuencia, esto se logra con el dato de temperatura obtenido anteriormente, si la temperatura es más alta que la señalada por el operador, el dispositivo disminuye la velocidad del abanico para disminuir el flujo del aire caliente que ingresa a la guardiola, pero si el valor de temperatura leído es menor se realiza lo contrario, o sea, se aumenta la velocidad del abanico.

Para la programación del panel táctil TP170A se utilizó un software llamado Protool Pro CS, con este software se puede configurar cualquier tipo de display de texto, paneles de operador, paneles táctiles y sistemas basados en Windows para un manejo y supervisión eficientes de las máquinas.

El rendimiento y el confort de los equipos están adaptados con mucha precisión a sus requisitos.

Protool es una aplicación de Windows para Windows 95, Windows 98 y Windows NT. Con la superficie operativa totalmente gráfica, sencillamente haciendo clic con el ratón se pueden crear proyectos basados en símbolos y orientados hacia el objeto. No son necesarios conocimientos especiales de programación. Además, puede seguir utilizando las aplicaciones de Windows con las que está familiarizado para, por ejemplo incluir gráficos en su proyecto.

En el apéndice C se puede observar como es físicamente el panel táctil TP170A, así como el desarrollo del proyecto, como se definieron las variables y como queda ordenados los avisos, textos de mensaje y botones de control.



**CAPÍTULO 6**  
**ANÁLISIS Y RESULTADOS**

El sistema que se construyó posee todas las características que se habían planteado inicialmente, como son: control de la temperatura del proceso, medición de humedad del producto, fácil manejo por ser presentada toda la información en un panel táctil, desde el cual se puede controlar el mismo; generación de alarmas, además de contar con un puerto de comunicación hacia una computadora personal, donde se muestran los resultados y se genera una base de datos.

Es importante mencionar que para la medición de humedad fue necesario el diseño de un circuito, en donde se tomó como base la característica que tiene el capacitor cilíndrico y que se pueden observar en su ecuación característica, tema que se explicó en el capítulo 3 de este informe.

Otro punto importante, es que la operación de todo el sistema es muy sencilla, y convierte a un panel táctil en interfase entre los operarios y el equipo instalado en la secadora. Desde este punto el operario puede monitorear y controlar con un ambiente gráfico todas las situaciones que se pueden presentar al inicio o durante el desarrollo del proceso.

Para el control de temperatura fue necesario utilizar un variador de frecuencia para gobernar la velocidad del abanico que impulsa el aire caliente al interior de la secadora. Un sensor de temperatura envía una señal al PLC con la información de la temperatura del aire, éste compara el dato con la temperatura de secado seleccionada por el operario y envía una orden al variador para que aumente, reduzca o mantenga constante la velocidad de giro del abanico. Es necesario recordar que si se aumenta la velocidad del abanico se aumenta la temperatura de secado y viceversa.

Este prototipo se encuentra instalado aproximadamente a 75 metros de la oficina del gerente general, y esta persona puede estar observando como se está desarrollando el secado del producto, y a su vez puede estar generando una base de

datos, ya sea en un archivo para posteriores consultas desde una computadora o impresa para presentarla a compradores u otras personas que se interesen por la calidad de secado del producto.

Se cuenta también con una alarma luminosa para que cuando el operario no se encuentre enfrente del panel, se active avisando que se está produciendo una situación anormal dentro del proceso que debe de ser solucionada inmediatamente. Una vez solucionado el problema la alarma se apaga automáticamente. Esta alarma es activada también una vez que el proceso se termine.

El sistema queda previsto para alguna ampliación, por ejemplo, si la empresa se interesa por colocar a cada secadora un equipo de estos, la variación en el programa del PLC es mínima, y en cuanto al hardware solamente es necesario agregar más módulos analógicos para la comunicación entre el PLC y los actuadores que se encuentran situados en las guardiolas.

Una de las limitaciones del proyecto es que: como el secado del café se basa en la transferencia de calor por convección, y el proceso dura entre 20 y 25 horas, la temperatura y humedad del ambiente varían drásticamente entre el día y la noche, afectando las condiciones psicrométricas del aire; en otras palabras no es lo mismo secar a 40 °C con una humedad relativa de un 40%, que secar a los mismos 40°C pero con una humedad relativa de un 75%. Con la primera condición la transferencia de humedad entre el producto y el aire es mayor, o sea, se seca más rápido (estas condiciones normalmente se dan de día), mientras que en el segundo caso la transferencia de humedad es menor (estas condiciones se presentan de noche).

Esto produce que el sistema tenga una incertidumbre mayor en cuanto al control de temperatura en la noche que en el día, por lo que tienda un poco a la inestabilidad, aunque nunca la alcance. La recomendación para eliminar este problema se expondrá en el capítulo siguiente.

**CAPÍTULO 7**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **7.1 Conclusiones**

- a.** El sensor de humedad diseñado no puede medir valores fuera del rango de los 10 a 50% de humedad del producto.
  
- b.** La temperatura de secado no se encuentra totalmente automatizada, porque necesita de un operario que introduzca más leña al horno cuando el sistema active la alarma de temperatura baja.
  
- c.** El sistema debe de tener alguna fuente de alimentación auxiliar para utilizarla en algún momento en que el alumbrado público falle.
  
- d.** El sistema puede ampliarse en el momento en que la empresa así lo desee.
  
- e.** Con la utilización del equipo la empresa se asegura que el producto final tenga una humedad homogénea.

## **7.2 Recomendaciones**

- a.** Sustituir los hornos por unos que utilicen otro combustible diferente a la leña, esta energía alternativa debe de tener la característica de poder manejarse desde el PLC, por ejemplo gas.
- b.** Incluir en el sistema un sensor de temperatura ambiental y un sensor de humedad relativa para reducir el error que se produce en el control de temperatura expuesto en el capítulo anterior.

## BIBLIOGRAFÍA

- Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, “Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, Cuarta Edición, Prentice Hall Hispanoamericana,1993.
- Manual “Programación de bloques: AWL para Simatic S7-300/400” Edición 1, Siemens,1996
- Manual “Autómata programable S7-300: Configuración, instalación y datos de las CPU”, Edición 2, Siemens, 1999.
- Manual de referencia “Sistemas de automatización S7-300 y M7-300: Datos de los módulos”, Edición 2, Siemens, 1998.
- Manual de usuario “SIMATIC HMI ProTool: Configurar sistemas basados en Windows”, Edición 12/99, Siemens, 1999.
- Manual de usuario “SIMATIC HMI ProTool: Configurar equipos con display gráfico” Edición 12/99, Siemens, 1999.

## APÉNDICES



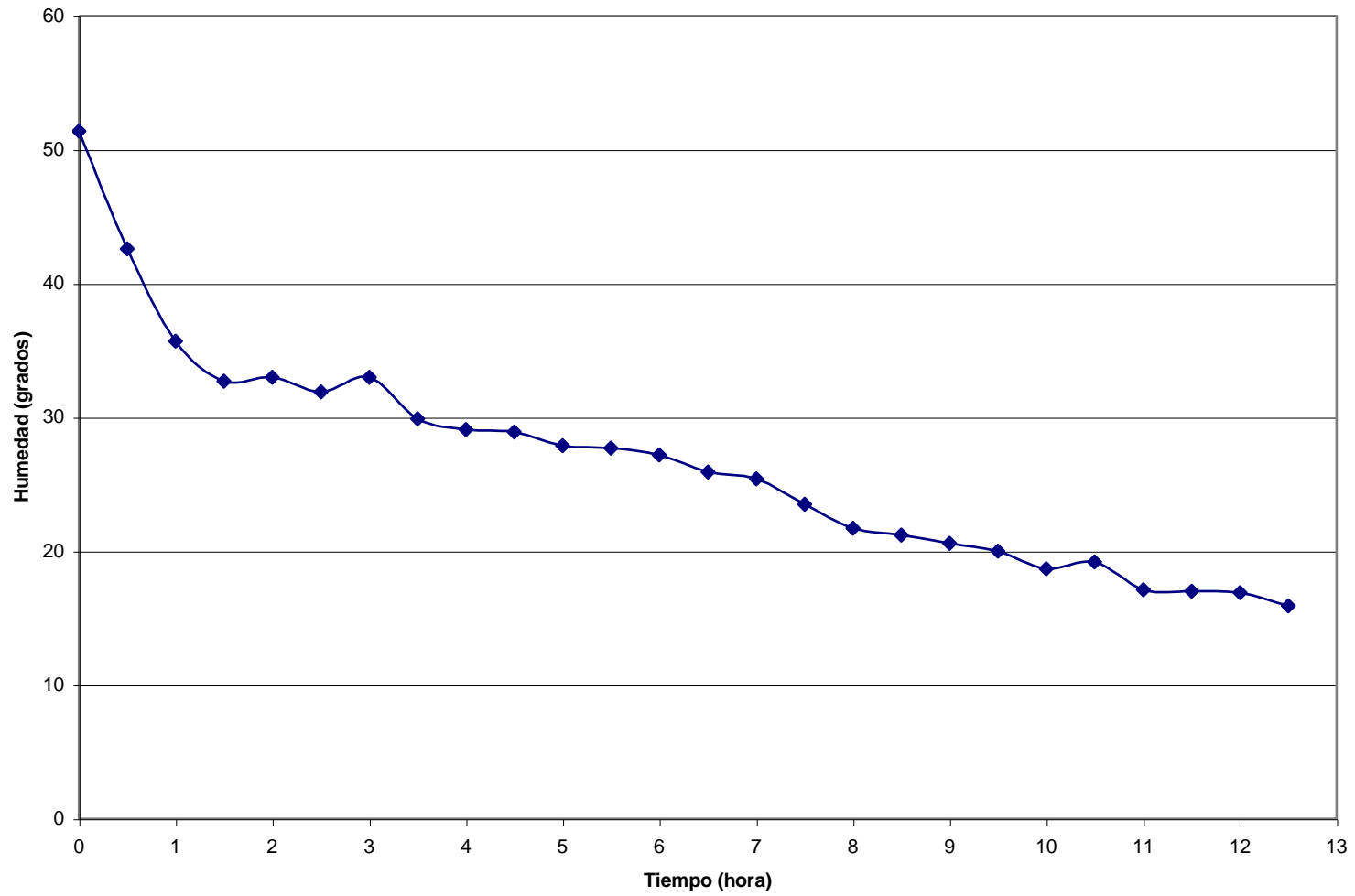
**APÉNDICE A**

**GRÁFICOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD vs TIEMPO PARA**

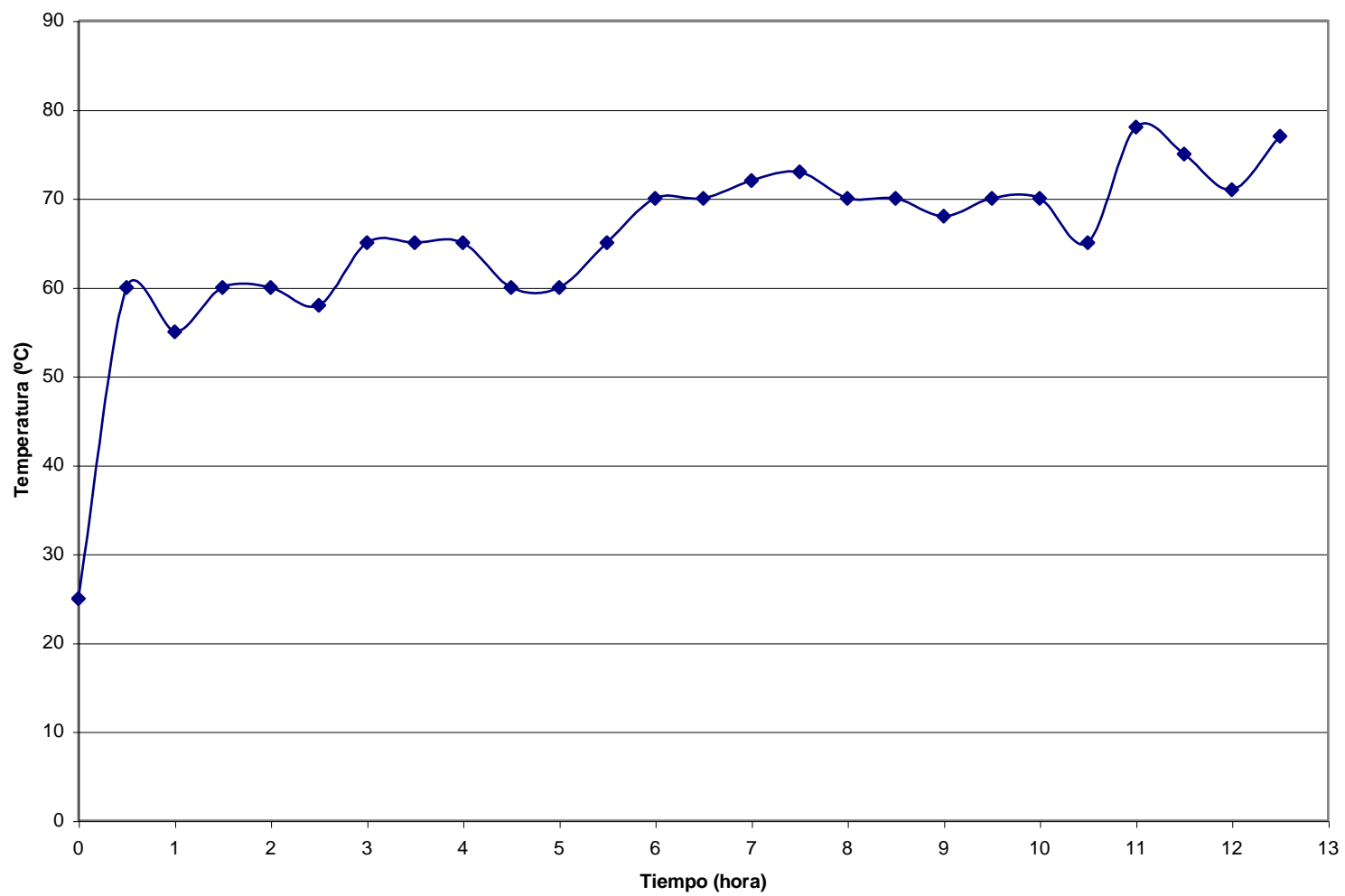
**EL PROCESO DE SECADO DE CAFÉ**



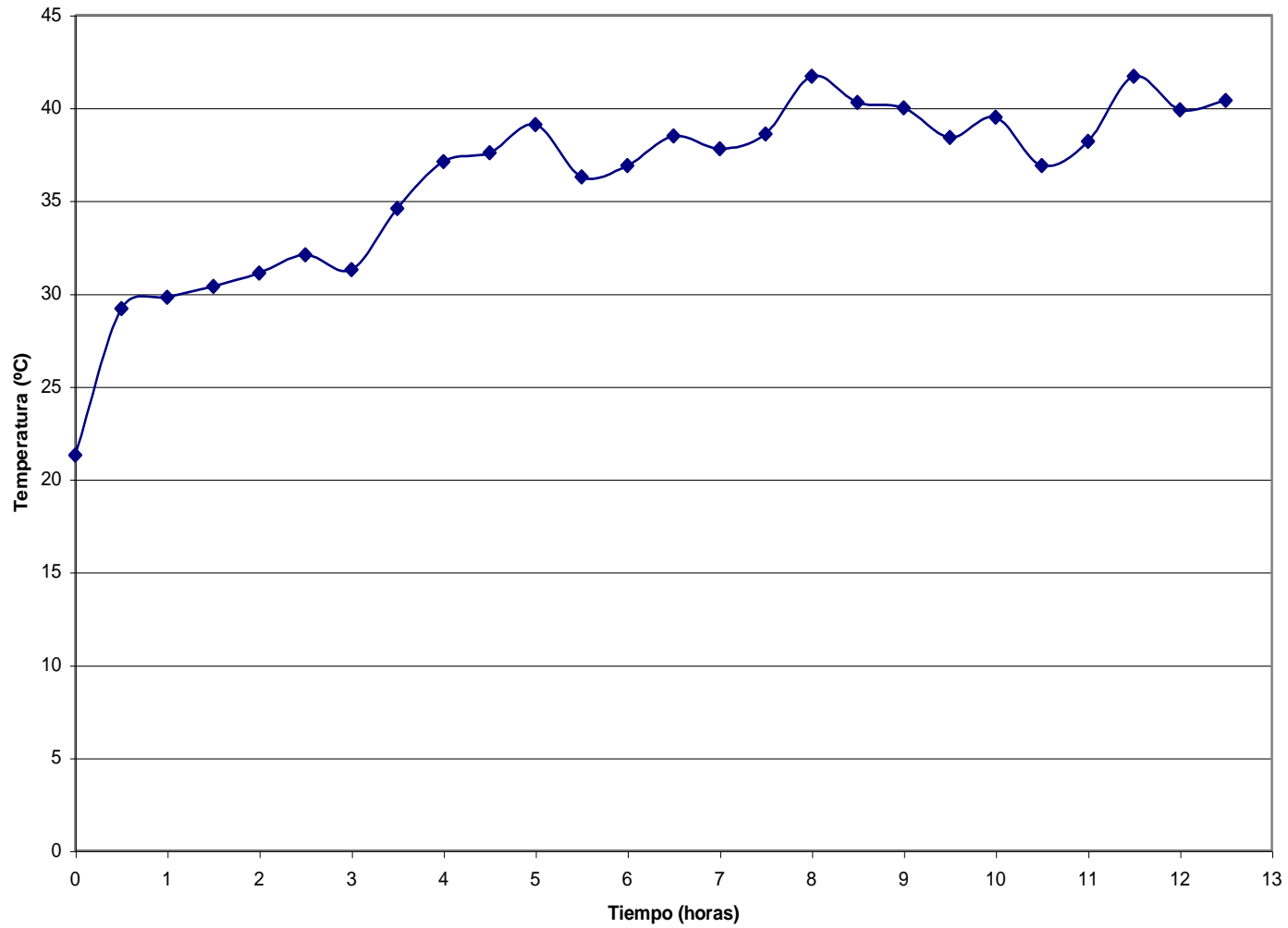
## Humedad del café en el proceso de secado Día 1



## Temperatura del aire que ingresa a la secadora Día 1



### Temperatura de la muestra de café en el proceso de secado Día 1

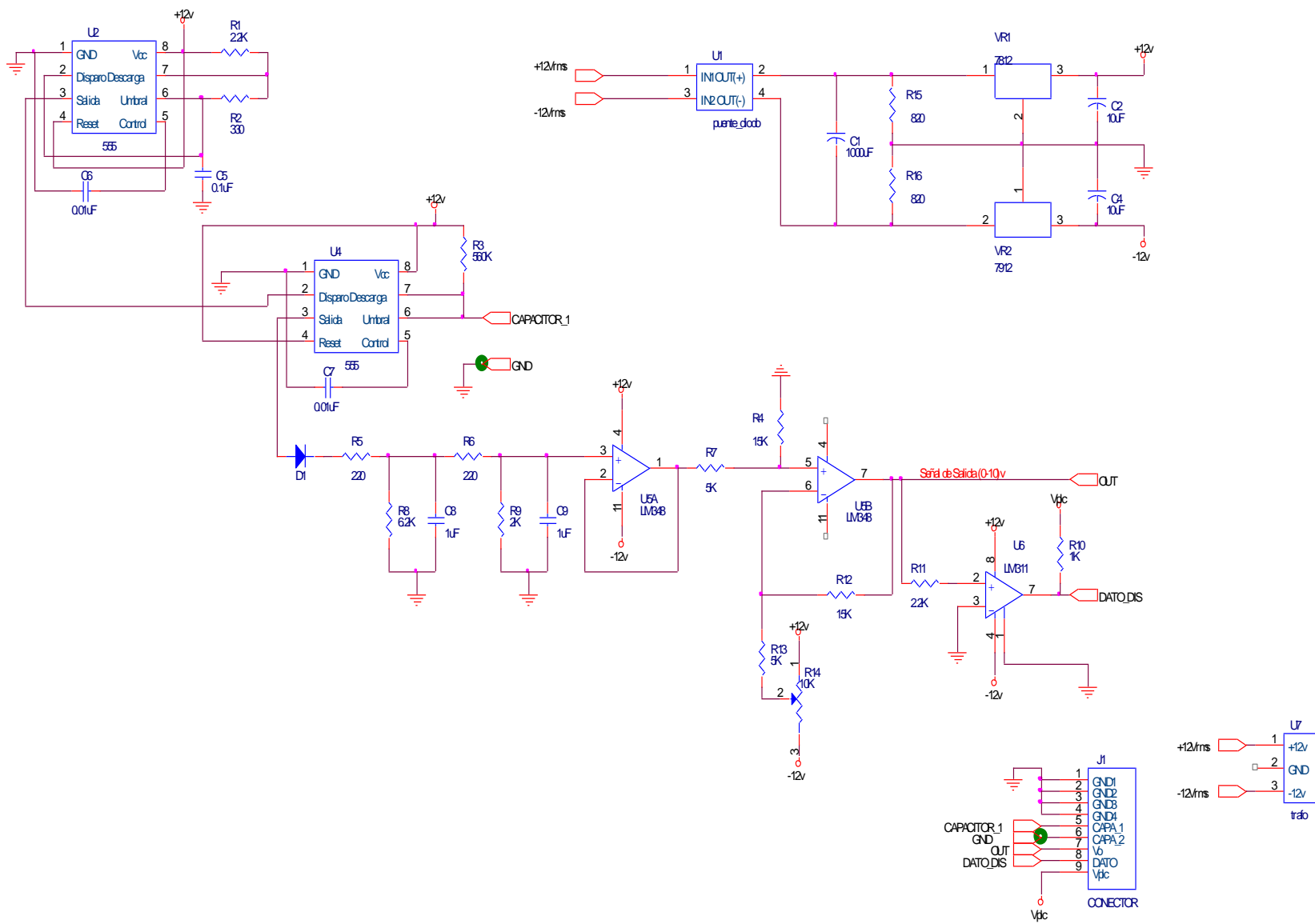




**APÉNDICE B**  
**DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL CIRCUITO**  
**CAPTURADOR DE HUMEDAD**

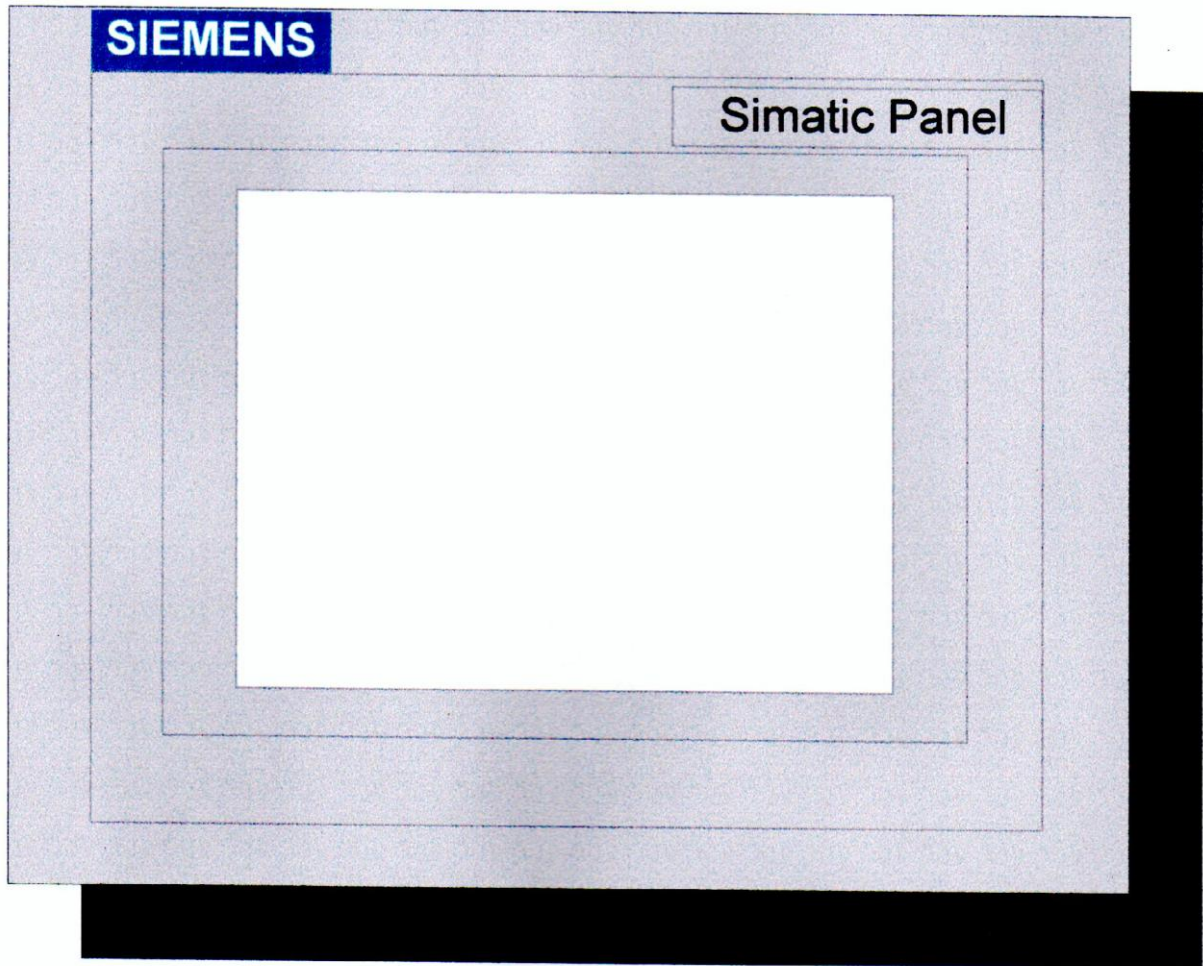








**APÉNDICE C**  
**INTERFASE GRÁFICA DEL PANEL TÁCTIL TP170A**



**Figura C.1** Vista frontal del panel táctil TP170A

# CONTROL DEL SECADO DE CAFÉ

CONFIGURAR

MONITOREO

CONF. TP

**Figura C.2** Menú general del panel táctil TP170A

# CONFIGURACIÓN

Tipo	Tem. secado
PUNTO	<00
CACHO	+   -

## ESTADO

INICIO	FIN	ATRAS
--------	-----	-------

Figura C.3 Menú de configuración del secado de café

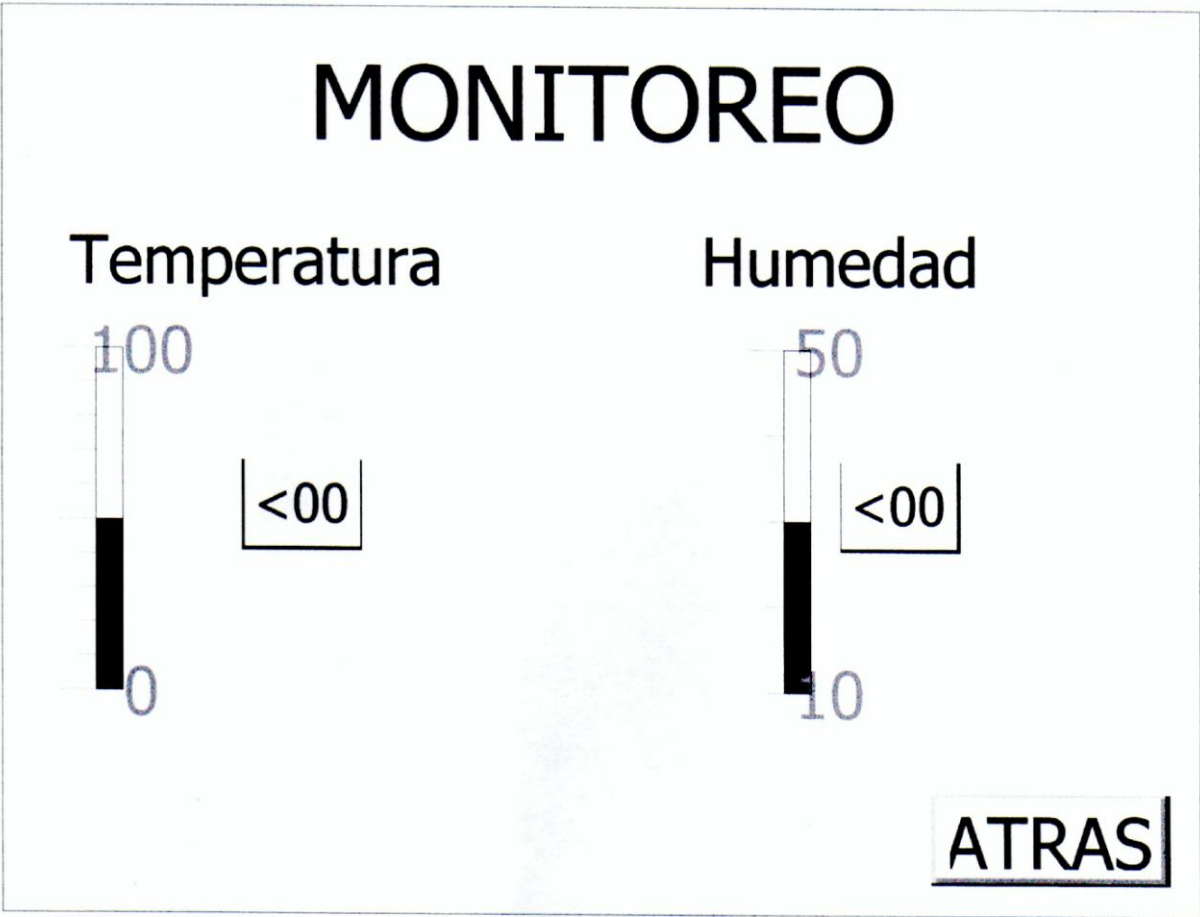


Figura C.4 Menú de monitoreo de proceso de secado de café.

# CONFIGURACIÓN DE LA PANTALLA

LIMPIEZA

REPROG.

Contraste

+

-

ATRÁS

Figura C.5 Menú de configuración del panel táctil TP170A