

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**”DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UN DESHIDRATADOR DE CHAROLAS GIRATORIAS”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

**PRESENTA**

**JULIO CÉSAR GARCÍA GUILLÉN**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. F. HUGO RAMÍREZ LEYVA**

**ASESOR**

**DR. RAÚL SALAS CORONADO**

**HUAJUAPAN DE LÉON, OAXACA, AGOSTO DE 2011**



# Dedicatoria

*A la fuente de mi inspiración*

*Mis padres: Sonia y Hugo César*

*Con amor y cariño*





# Agradecimientos

La realización de una tesis en un primer momento pareció algo sencillo, pero como fue transcurriendo el tiempo me di cuenta que no era como inicialmente lo pensé. No fue sencillo, pero también me dejó muchas más enseñanzas de las que había imaginado y todo esto gracias a las personas que se vieron involucradas en este proyecto, desde los profesores, mis compañeros y amigos, así como mis familiares.

Debo agradecer principalmente a mi padres por haberme dado la oportunidad de vivir esta experiencia, sin su ayuda simplemente esto no hubiera sido posible. A mi madre por haber sido la forjadora de mis valores; gracias por siempre creer en mí y por incentivarme a seguir adelante cuando todo parecía más sombrío. A mi padre por ser el símbolo de superación en mi vida y por haberme iniciado en el mundo de la electrónica, sin tus enseñanzas y consejos hubiera sido más difícil recorrer este camino.

A mi hermana por todo el apoyo y por enseñarme a siempre levantarme y seguir adelante. A mi hermano por toda la comprensión ante diversas circunstancias. Y a mi sobrina por las risas y ocurrencias que siempre ayudan a olvidar los problemas.

A las nuevas integrantes de mi vida, Zayra y Mayrin, por ser las nuevas impulsoras para seguir adelante. Agradezco de manera especial a Zay por haberme enseñado la parte que me faltaba conocer de la vida, ha sido y seguirá siendo maravilloso ir descubriendo juntos el mundo.

A mi familia en general, en especial a mis primos Hilda y Jorge que siempre han mostrado interés en las cosas que emprendo.

A todos mis compañeros de generación porque cada persona te enseña algo diferente: Eduardo, Eucario, Arzat, David, Enrique, Andrea, Uciel, Edén, Edgar, Cristóbal, Rogelio, Fidel, Isau-ro, Edel, Nayelli, David (Tempra), Sergio, Edgar (Pollo), Ismael y Neza.

A mis compañeros de estancias profesionales: Eduardo, Arzat, Julio y Eucario con quienes pase buenos momentos en Guadalajara y DF.

A quienes a pesar del tiempo siguen en comunicación conmigo, por lo que los considero mis amigos Eduardo (Goyo), Rodrigo (Ponzo), Eric (Saavedra), Luis Daniel (Alemán), Julio (Lean coach), Mayra (May) y David (Vicho).

A mis compañeros tesisistas porque junto a ellos aprendí nuevas cosas, gracias por sus tips y consejos: Julio, Vicho, Fidel, Mayra, Andrea, Juan Carlos y Miguel.

También quiero agradecer de manera enfática por la comprensión y más que nada el apoyo a mi director de tesis el M.C Hugo Ramírez Leyva, que en todo momento estuvo disponible para aclarar mis dudas y aportar ideas para hacer de este un mejor trabajo. De igual forma quiero agradecer al Dr. Raúl Salas Coronado todo el apoyo y las facilidades para la realización de este proyecto.

A todos los profesores, ya que de manera indirecta se involucraron en el proyecto, ya que sus enseñanzas, sugerencias y comentarios fueron parte importante para lograr realizar este trabajo: Hugo R. Leyva, Raúl S. Coronado, Enrique Guzmán, Heriberto Hernández, Jesús Linares, Esteban Guerrero, Jorge Barahona, Arturo P. Sandoval, Jacob Vásquez y Felipe Santiago.

Y también a todos los que me faltaron mencionar, ya que como se han de imaginar los agradecimientos siempre se escriben al último y es imposible recordar a todos cuando más ansias se tienen de terminar.

# Resumen

La técnica de deshidratado es utilizada desde hace muchos años para conservar durante más tiempo los alimentos. Existen técnicas de deshidratado muy simples como lo son: solar y a la sombra, pero dependen de factores climáticos. Con el tiempo se han ido utilizando técnicas de secado más complejas en las que se requiere controlar las variables involucradas en este proceso, con lo cual se ha mejorado la calidad del deshidratado; pudiendo así conservar el color, sabor y nutrientes de los alimentos.

El propósito de este trabajo de tesis es diseñar un sistema de control y monitoreo del deshidratador de charolas giratorias del laboratorio de agroindustrias de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Este trabajo de tesis se divide en dos etapas: desarrollo de hardware y desarrollo de software. Este último se divide en desarrollo de software empotrado y desarrollo de la interfaz de usuario.

El hardware está formado básicamente por dos sensores con los cuales se monitorea y controla la temperatura a través de un microcontrolador, que a su vez mantiene la comunicación con una computadora personal en donde se lleva la configuración, monitoreo y sintonización del proceso. El flujo de aire es proporcionado por un ventilador que es controlado a través del microcontrolador. El control de la temperatura y el flujo de aire se llevan a cabo mediante un control por ciclos.

El software empotrado es el programa incrustado en el microcontrolador y con el cual se realizan todas las funciones de control del sistema, la comunicación con el panel frontal y la computadora personal. El software de la interfaz de usuario tiene como función mostrar al usuario de forma gráfica todas las funcionalidades del sistema (configuración, monitoreo y sintonización).



# Índice

|   |            |
|---|------------|
| <b>Dedicatoria</b>                                  | <b>I</b>   |
| <b>Agradecimientos</b>                              | <b>II</b>  |
| <b>Resumen</b>                                      | <b>V</b>   |
| <b>Índice general</b>                               | <b>VI</b>  |
| <b>Índice de Figuras</b>                            | <b>XI</b>  |
| <b>Índice de Tablas</b>                             | <b>XVI</b> |
| <b>1. Introducción</b>                              | <b>1</b>   |
| 1.1. Sistemas para el Deshidratado . . . . .        | 2          |
| 1.2. Horno Deshidratador de la UTM . . . . .        | 6          |
| 1.3. Hipótesis . . . . .                            | 7          |
| 1.4. Objetivo General . . . . .                     | 7          |
| 1.5. Objetivos Específicos . . . . .                | 8          |
| 1.6. Metas . . . . .                                | 8          |
| 1.7. Contenido de la tesis . . . . .                | 9          |
| <b>2. Marco Teórico</b>                             | <b>11</b>  |
| 2.1. Clasificación de los deshidratadores . . . . . | 12         |
| 2.1.1. Deshidratadores por convección . . . . .     | 13         |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.1.2.    | Deshidratadores por conducción . . . . .                     | 13        |
| 2.1.3.    | Deshidratadores por radiación . . . . .                      | 14        |
| 2.2.      | Horno Deshidratador de la UTM . . . . .                      | 14        |
| 2.3.      | Sensores y Actuadores . . . . .                              | 14        |
| 2.3.1.    | Transductores de Temperatura . . . . .                       | 15        |
| 2.3.2.    | Sensores de Flujo de Aire . . . . .                          | 17        |
| 2.3.3.    | Acondicionamiento de Señal . . . . .                         | 17        |
| 2.4.      | Sistema de Control . . . . .                                 | 18        |
| 2.4.1.    | Partes de un Sistema de Control de Temperatura . . . . .     | 18        |
| 2.4.2.    | Control de Potencia: Todo o Nada . . . . .                   | 19        |
| 2.4.3.    | Control de Potencia: Por Ángulo de Fase . . . . .            | 20        |
| 2.4.4.    | Control de Potencia: Tipo Integral ó PWM . . . . .           | 20        |
| 2.4.5.    | Controlador Proporcional - Integral (PI) . . . . .           | 22        |
| 2.4.6.    | Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) . . . . . | 23        |
| 2.4.7.    | Sintonización del Controlador . . . . .                      | 24        |
| 2.5.      | Etapa de Potencia . . . . .                                  | 25        |
| 2.6.      | Software de Programación Gráfica . . . . .                   | 27        |
| <b>3.</b> | <b>Diseño de Hardware</b> . . . . .                          | <b>29</b> |
| 3.1.      | Descripción General del Sistema ContHorno . . . . .          | 29        |
| 3.2.      | El Horno . . . . .   | 31        |
| 3.2.1.    | Sensores . . . . .   | 31        |
| 3.2.2.    | Actuadores . . . . .   | 32        |
| 3.3.      | Etapa de acondicionamiento de señal . . . . .                | 33        |
| 3.3.1.    | Sección de acondicionamiento de señal . . . . .              | 34        |
| 3.3.2.    | Sección de Selección . . . . .                               | 36        |
| 3.3.3.    | Sección de Potencia . . . . .                                | 36        |
| 3.4.      | Módulo de Procesamiento . . . . .                            | 37        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.5. Interfaz con la computadora . . . . .           | 39        |
| 3.6. Panel Frontal . . . . .                         | 40        |
| <b>4. Diseño de Software Empotrado</b>               | <b>43</b> |
| 4.1. Modelo de Desarrollo . . . . .                  | 43        |
| 4.2. Especificación de Software . . . . .            | 44        |
| 4.3. Análisis de Software . . . . .                  | 45        |
| 4.3.1. Módulo de Pre-inicialización . . . . .        | 45        |
| 4.3.2. Módulo de Configuración Local . . . . .       | 46        |
| 4.3.3. Módulo de Configuración Remoto . . . . .      | 46        |
| 4.3.4. Módulo de Inicialización . . . . .            | 47        |
| 4.3.5. Módulo de Control de Proceso . . . . .        | 47        |
| 4.3.6. Módulo de Comunicación Serial . . . . .       | 47        |
| 4.4. Diseño de Soft-ContHornoMC . . . . .            | 47        |
| 4.4.1. Módulo de Pre-Inicialización . . . . .        | 48        |
| 4.4.2. Módulo de Configuración Remota . . . . .      | 50        |
| 4.4.3. Módulo de Configuración Local . . . . .       | 50        |
| 4.4.4. Módulo de Inicialización . . . . .            | 50        |
| 4.4.5. Módulo de Control del Proceso . . . . .       | 52        |
| 4.4.6. Módulo de Comunicación Serial . . . . .       | 59        |
| <b>5. Diseño de Interfaz de Usuario</b>              | <b>63</b> |
| 5.1. Especificación de Software . . . . .            | 63        |
| 5.2. Análisis de Software . . . . .                  | 64        |
| 5.3. Diseño del Soft-ContHornoPC . . . . .           | 64        |
| 5.3.1. Módulos del Bloque de Configuración . . . . . | 65        |
| 5.3.2. Módulos del Bloque de Sintonización . . . . . | 69        |
| 5.3.3. Módulos del Bloque de Monitoreo . . . . .     | 73        |

---

|   |            |
|---|------------|
| 5.4. Interfaz de Usuario . . . . .                    | 75         |
| <b>6. Pruebas y Resultados</b>                        | <b>81</b>  |
| 6.1. Pruebas de Hardware . . . . .                    | 82         |
| 6.1.1. Prueba de detector de cruce por cero . . . . . | 82         |
| 6.1.2. Prueba de módulo de procesamiento . . . . .    | 83         |
| 6.1.3. Pruebas de etapa de potencia . . . . .         | 83         |
| 6.2. Pruebas de Sintonización del Sistema . . . . .   | 87         |
| 6.3. Pruebas de Software . . . . .                    | 88         |
| 6.4. Pruebas de Calibración . . . . .                 | 91         |
| <b>7. Conclusiones</b>                                | <b>97</b>  |
| 7.1. Trabajos Futuros . . . . .                       | 98         |
| <b>Bibliografía</b>                                   | <b>100</b> |
| <b>URL's</b>  | <b>102</b> |
| <b>A. Manual de Usuario del Control del Horno</b>     | <b>105</b> |
| A.1. Modo de Operación Local . . . . .                | 105        |
| A.2. Modo de Operación Remoto . . . . .               | 106        |
| <b>B. Manual de Hardware</b>                          | <b>113</b> |
| B.1. AcondS-PCB . . . . .                             | 113        |
| B.2. Pot-PCB . . . . .                                | 114        |
| B.3. ProcessCom-PCB . . . . .                         | 115        |



# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Secado solar y secado a la Sombra . . . . .                          | 2  |
| 1.2. Horno Industrial . . . . .   | 2  |
| 1.3. Horno Industrial marca IMPALAB . . . . .                             | 3  |
| 1.4. Sistema de Calentamiento de Circulación Forzada . . . . .            | 4  |
| 1.5. Secador Convectivo de Aire Caliente . . . . .                        | 5  |
| 1.6. Secador de Charolas Giratorias . . . . .                             | 5  |
| 1.7. Vista Frontal y Lateral del Horno . . . . .                          | 7  |
| 2.1. Deshidratado de Tomate . . . . .                                     | 12 |
| 2.2. Sensor de Temperatura LM35 . . . . .                                 | 16 |
| 2.3. Anemómetro digital Twilight modelo AVM-07 . . . . .                  | 17 |
| 2.4. Empaquetado de Opam . . . . .  | 18 |
| 2.5. Sistema de Control de Temperatura . . . . .                          | 19 |
| 2.6. Diagrama a bloques de un sistema de control de temperatura . . . . . | 19 |
| 2.7. Gráfica de variación de pulsos . . . . .                             | 21 |
| 2.8. Variación de potencia respecto al número de ciclos activos . . . . . | 22 |
| 2.9. Diagrama a bloques del controlador PI . . . . .                      | 23 |
| 2.10. Diagrama a bloques de controlador PID . . . . .                     | 24 |
| 2.11. Gráfica de la respuesta al escalón del sistema . . . . .            | 25 |
| 2.12. Empaquetado y Símbolo de un Optoacoplador . . . . .                 | 26 |

---

|   |    |
|---|----|
| 2.13. Empaquetado y Símbolo de TRIAC . . . . .                              | 26 |
| 2.14. Disparo de un Triac mediante un Optoacoplador . . . . .               | 27 |
| 2.15. Panel Frontal de LabVIEW . . . . .                                    | 28 |
| 2.16. Diagrama a bloques de LabVIEW . . . . .                               | 28 |
| 3.1. Diagrama a bloques del Sistema . . . . .                               | 30 |
| 3.2. Diagrama a bloques detallado del Sistema . . . . .                     | 31 |
| 3.3. Diagrama de conexión del sensor de temperatura LM35 . . . . .          | 32 |
| 3.4. Calefactor, Ventilador y Charolas del horno . . . . .                  | 33 |
| 3.5. Diagrama a bloques de la etapa de acondicionamiento de señal . . . . . | 33 |
| 3.6. Pines del CI LM358 . . . . .   | 34 |
| 3.7. Diagrama de conexión de amplificador no inversor . . . . .             | 35 |
| 3.8. Diagrama de conexión de detector de cruce por cero . . . . .           | 35 |
| 3.9. Simulación de detector de cruce por cero . . . . .                     | 36 |
| 3.10. Circuito de Potencia para los Actuadores . . . . .                    | 37 |
| 3.11. Simulación de etapa de Potencia . . . . .                             | 38 |
| 3.12. Microcontrolador Atmega16L . . . . .                                  | 38 |
| 3.13. Diagrama de Conexión de microcontrolador y periféricos . . . . .      | 39 |
| 3.14. Configuración de CI MAX232 . . . . .                                  | 40 |
| 3.15. LCD 2x16 . . . . .  | 41 |
| 3.16. Teclado matricial de 3x4 . . . . .                                    | 41 |
| 3.17. Interruptor tipo palanca . . . . .                                    | 41 |
| 4.1. Esquema del modelo evolutivo incremental . . . . .                     | 44 |
| 4.2. Módulos de Soft-ContHornoMC . . . . .                                  | 46 |
| 4.3. Diagrama de Flujo General del Sistema . . . . .                        | 49 |
| 4.4. Configuración de E/S del microcontrolador . . . . .                    | 50 |
| 4.5. Diagrama de flujo de módulo de configuración remota . . . . .          | 51 |

---

|  |    |
|--|----|
| 4.6. Diagrama de flujo de módulo de configuración local . . . . .        | 52 |
| 4.7. Diagrama de flujo del módulo de inicialización . . . . .            | 54 |
| 4.8. Diagrama de flujo de INTO . . . . .                                 | 56 |
| 4.9. Diagrama de Flujo del Timer1 . . . . .                              | 57 |
| 4.10. Sistema a lazo cerrado con controlador PI . . . . .                | 57 |
| 4.11. Método de Sumas de Riemann . . . . .                               | 58 |
| 4.12. Trama de recepción de datos . . . . .                              | 59 |
| 4.13. Tramas de configuración y monitoreo . . . . .                      | 60 |
| 4.14. Diagrama de flujo de interrupción por recepción de datos . . . . . | 61 |
| 4.15. Diagrama de flujo de la función de transmisión de datos . . . . .  | 62 |
| 5.1. Bloques del Soft-ContHornoPC . . . . .                              | 65 |
| 5.2. Diagrama de flujo general del Soft-ContHornoPC . . . . .            | 66 |
| 5.3. Módulo de Usuario Tipo Operador . . . . .                           | 67 |
| 5.4. Módulo de Usuario Tipo Administrador . . . . .                      | 67 |
| 5.5. Módulo de configuración del puerto serial . . . . .                 | 68 |
| 5.6. Icono del módulo de recepción de datos iniciales . . . . .          | 68 |
| 5.7. Icono del módulo de configuración de parámetros . . . . .           | 69 |
| 5.8. Icono del módulo de sintonización de constantes . . . . .           | 70 |
| 5.9. Icono del módulo de control de temperatura manual . . . . .         | 70 |
| 5.10. Icono del módulo de rango de controlador PI . . . . .              | 71 |
| 5.11. Icono del módulo de calibración de flujo de aire actual . . . . .  | 72 |
| 5.12. Icono del módulo de re-calibración de flujo de aire . . . . .      | 73 |
| 5.13. Icono del módulo de recepción de temperatura actual . . . . .      | 73 |
| 5.14. Icono del módulo de estado de proceso . . . . .                    | 74 |
| 5.15. Icono del módulo de graficación . . . . .                          | 74 |
| 5.16. Icono del módulo de alerta . . . . .                               | 74 |
| 5.17. Icono del módulo guardar historial . . . . .                       | 75 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 5.18. Icono del módulo terminar proceso . . . . .  | 75  |
| 5.19. Sección Inicio . . . . .   | 76  |
| 5.20. Sección de Configuración . . . . .   | 77  |
| 5.21. Sección de Monitoreo . . . . .   | 78  |
| 5.22. Sección de Sintonización . . . . .   | 79  |
| 6.1. Comportamiento del detector de cruce por cero . . . . .   | 82  |
| 6.2. (a). Señal de control y salida para un flujo de aire máximo (1.3 m/s). (b). Señal de control y salida para un flujo de aire de 1.2 m/s. (c). Señal de control y salida para un flujo de aire de 1.0 m/s. (d). Señal de control y salida para un flujo de aire de 0 m/s. . . . . | 85  |
| 6.3. (a). Ciclos de CA en los calefactores al llegar a la temperatura deseada. (b). Activación de los calefactores para regular la temperatura. (c). Señal de Control y Señal de Salida en los calefactores. (d). Señal de Control y Señal de Salida en los calefactores. . . . .    | 86  |
| 6.4. Sección de Configuración . . . . .  | 89  |
| 6.5. Sección de Monitoreo . . . . .  | 90  |
| 6.6. Prueba Completa de Monitoreo . . . . .  | 91  |
| 6.7. Software del Anemómetro . . . . .   | 92  |
| 6.8. (a) Colocación de la sonda del anemómetro vista desde la cámara de secado. (b) Colocación de la sonda vista desde afuera del deshidratador. (c) Colocación del anemómetro para calibración. . . . .   | 93  |
| 6.9. Sección de Sintonización . . . . .  | 95  |
| A.1. Panel Frontal del Secador . . . . .   | 106 |
| A.2. Diagrama de flujo de configuración en modo local . . . . .  | 109 |
| A.3. Diagrama de flujo de configuración en modo remoto . . . . .   | 111 |
| A.4. Sección de Configuración de Parámetros . . . . .  | 111 |
| A.5. Sección de Monitoreo . . . . .  | 112 |
| A.6. Sección de Sintonización . . . . .  | 112 |

---

|   |     |
|---|-----|
| B.1. Diagrama a bloques del hardware . . . . .  | 114 |
| B.2. Diagrama esquemático del AcondS-PCB . . . . .  | 115 |
| B.3. (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del<br>PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real. . . . . | 116 |
| B.4. Diagrama esquemático del AcondS-PCB . . . . .  | 117 |
| B.5. (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del<br>PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real. . . . . | 119 |
| B.6. Diagrama esquemático del ProcessCom-PCB . . . . .  | 121 |
| B.7. (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del<br>PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real. . . . . | 122 |



# Índice de tablas

|  |     |
|--|-----|
| 2.1. Ventajas y Desventajas de Transductores de Temperatura . . . . .  | 16  |
| 2.2. Ecuaciones de Sintonización de Ziegler-Nichols . . . . .          | 24  |
| 4.1. Descripción de variables utilizadas en Soft-ContHornoMC . . . . . | 48  |
| 4.2. Configuración de Periféricos . . . . .                            | 53  |
| 4.3. Calibración de Flujo de Aire . . . . .                            | 53  |
| 4.4. Tabla de prioridad de interrupciones . . . . .                    | 55  |
| 4.5. Tabla de descripción de los bytes de control . . . . .            | 60  |
| 5.1. Parámetros de configuración de una comunicación serial . . . . .  | 67  |
| 5.2. Tabla de calibración de flujo de aire . . . . .                   | 72  |
| 6.1. Calibración de Flujo de Aire . . . . .                            | 94  |
| 6.2. Calibración de Flujo de Aire . . . . .                            | 94  |
| A.1. Calibración de Flujo de Aire . . . . .                            | 107 |
| B.1. Cotización del EAS-PCB . . . . .                                  | 118 |
| B.2. Cotización del EPOT-PCB . . . . .                                 | 120 |
| B.3. Cotización del ProcessCom-PCB . . . . .                           | 123 |





# Capítulo 1

# Introducción

El proceso de deshidratado es actualmente usado por una gran variedad de industrias, entre las más importantes están las de alimentos, textiles, minerales, maderas, etc. Este proceso consiste en extraer el agua contenida en los materiales a tratar, por eso también recibe el nombre de secado. Esto se puede hacer por medios mecánicos (prensas) o por medios térmicos. Para realizarse se lleva a cabo un gasto de energía, por lo que en la medida que se tiene un proceso más eficiente se consigue una mejor relación costo beneficio [9].

El deshidratado de materiales biológicos, como los alimentos, se empezó a emplear con el fin de preservar éstos por largo tiempo. Los microorganismos que provocan la descomposición no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua, y las enzimas que causan cambios químicos en los alimentos no funcionan sin ella; así los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10 %, sin embargo la humedad no debe reducirse por debajo del 5 % para preservar el sabor y el valor nutritivo del alimento [9]. Por tal motivo un alimento deshidratado se conserva por un mayor tiempo.

Para realizar el deshidratado de un alimento, se requiere aplicarle calor para transferir la humedad desde la superficie del mismo al aire circundante. La forma más simple de hacer esto es usando el secado solar, que consiste en poner el alimento directamente a los rayos del sol (figura 1.1); otra forma es el secado a la sombra (figura 1.1), que se usa en zonas con clima seco y presencia de vientos constantes. Ambos esquemas han sido usados desde tiempos remotos, sin embargo, aunque son muy económicos dependen mucho del clima y en ocasiones no se alcanza un nivel de secado apropiado.

En la industria los procesos demandan homogeneidad, por tal motivo es poco factible utilizar los sistemas de secado descritos anteriormente. Los secadores industriales usan aire caliente y mantienen un control preciso del flujo y la temperatura del aire de la cámara. En la figura 1.2, se muestra un horno de este tipo.

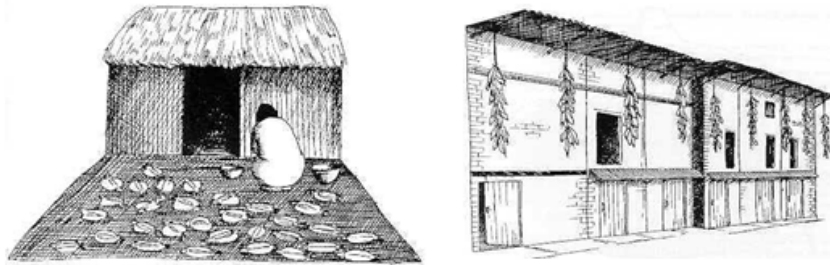


Figura 1.1: Secado solar y secado a la Sombra



Figura 1.2: Horno Industrial

## 1.1. Sistemas para el Deshidratado

En la industria la etapa de secado es una de las que más energía demandan, por lo que con un control eficiente sobre el proceso se pueden reducir los costos de operación, de mantenimiento y tiempo de secado, además de obtener las propiedades y calidad deseada en los productos deshidratados, como son: tamaño, color, porosidad, textura, etc. Haciendo una investigación se encontraron los siguientes casos prácticos que ejemplifican lo antes expuesto:

- En el secado de granos, la optimización del proceso ha permitido disminuir los costos de secado en un 33.6%. También la sintonización óptima de las fuentes de calor ha llegado a ser 85% menor que la normal [6].
- Con la aplicación de un controlador PI en un secador rotatorio, la producción en una compañía se incrementó en 1.4%, haciendo que las ganancias de la compañía aumentaran en 105,845 dólares/año. De igual forma el consumo de energía decreció el 7%. Con todos estos ahorros el sistema recuperó el costo por inversión en 9 meses [6].

El interés por el secado de alimentos es de carácter industrial y académico. En México hay varias empresas dedicadas a la construcción de hornos, entre las cuales se encuentra la compañía

IMPALAB S.A de C.V que fabrica hornos de temperatura baja, su principal aplicación es en el deshidratado. Las características de este tipo de hornos son [27]:

- Horno de circulación forzada para extracción de humedad.
- Temperatura máxima de operación 150 °C.
- Rack contenedor y puerta tipo cortina automática.
- Totalmente en acero inoxidable.
- Control digital tipo PID, ON/OFF Y RAMPA.
- Volumen de 1.6  $ft^3$ .
- Alarma sonora visual para exceso de temperatura.
- Turbina de 15 CFM<sup>1</sup>.
- Voltaje de operación a 127 V, potencia de 2200 W y corriente de 18 Amperes (Ver Figura 1.3).



Figura 1.3: Horno Industrial marca IMPALAB

Este tipo de hornos usan un sistema de calentamiento llamado de “circulación forzada”, el cual se muestra en la Figura 1.4. Para regular la temperatura y extraer la humedad se inyecta aire frío a la cámara de secado. El sistema consta de las siguientes partes:

---

<sup>1</sup>CFM. Cubic Feet per Minute. Pie Cúbico por Minuto.

- Turbina: encargada de inyectar aire frío a la cámara del horno.
- Resistencias: encargada de aumentar la temperatura del horno.
- Chimenea: para la salida del vapor de agua.

El principio de funcionamiento del sistema de calentamiento por circulación forzada es el siguiente: Los calefactores son encendidos y comienzan a calentar el horno; cuando el horno ya está a la temperatura requerida, la turbina es encendida para que entre aire frío a la cámara de secado y así homogenizar la temperatura; la humedad sale por la chimenea. El control del encendido de los calefactores y la turbina se realiza mediante controladores PID, on/off o tipo rampa, lo cual garantiza la regulación de la temperatura.

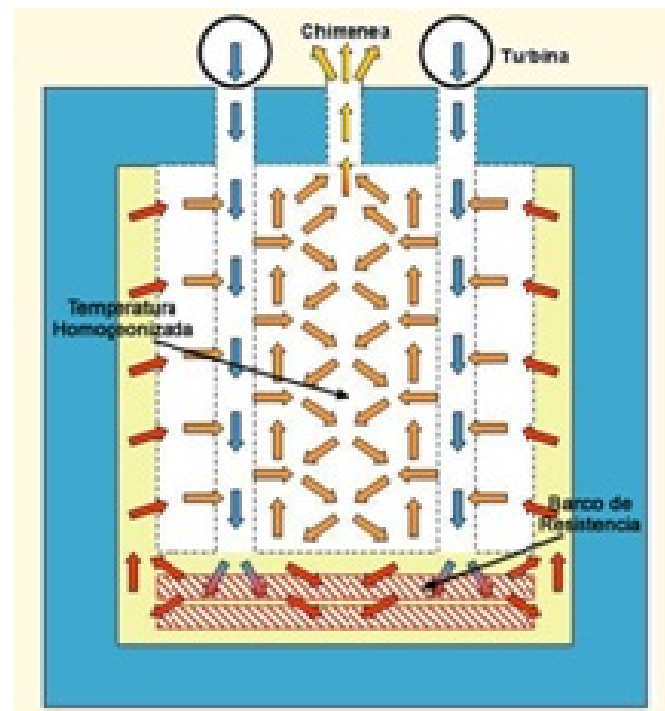


Figura 1.4: Sistema de Calentamiento de Circulación Forzada

Dentro del sector académico, tres universidades Chilenas desarrollaron el proyecto de “Automatización de un Secador Convectivo de Aire Caliente, para fines de Docencia en Ingeniería de Alimentos”. Éste es un dispositivo capaz de registrar las variables del proceso de secado y mostrar la imagen de la muestra deshidratada en tiempo real, además de transmitir dicha información a través de Internet. En la figura 1.5 se muestra el modelo de dicho horno.

También en el sector académico, en el año 2006, en el área de Ingeniería en Alimentos de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), se desarrolló un horno de secado. La figura 1.6 muestra una fotografía del mismo.

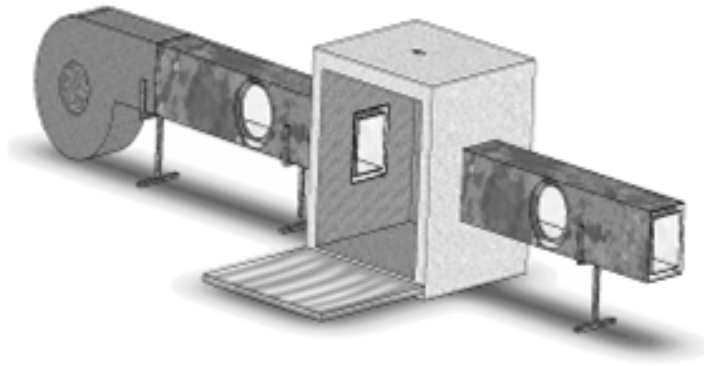


Figura 1.5: Secador Convectivo de Aire Caliente



Figura 1.6: Secador de Charolas Giratorias

Algunas de las principales características con las que cuenta este horno son [11]:

- Horno secador de charolas giratorio.
- Temperatura de operación entre 20 y 60 °C.
- Tiempo de estabilización de temperatura 10 minutos.
- Velocidad del aire entre 0 y 1.2 m/s.
- Control de temperatura basado en el principio de todo-nada (on-off) por relevador.
- Medición del flujo de aire con base en la velocidad de rotación de las hélices del ventilador.
- Control manual del horno desde su panel frontal sin registro de historiales de la temperatura.

Con el desarrollo de este trabajo de tesis se pretende eliminar o suprimir algunos de los problemas que se han presentado, principalmente en la etapa de potencia y control, así como incrementar sus capacidades de medición y control.

Algunos problemas se presentaron debido a que la etapa de potencia estaba diseñada a base de relevadores, que al combinarse con el uso de un control on-off reducía el tiempo de vida de estos considerablemente.

## 1.2. Horno Deshidratador de la UTM

El deshidratador de la UTM funciona bajo el principio de transferencia de calor por convección. Por medio de una fuente de energía eléctrica y un ventilador se hace circular el aire caliente alrededor de los alimentos contenidos en charolas giratorias, esto con el fin de hacer más homogéneo el proceso de secado.

El horno es una estructura mecánica construida internamente con lámina de acero inoxidable, para que no contamine los alimentos; la carcasa está hecha de lámina de aluminio y placas de poliestireno expandido, para minimizar la transferencia de calor desde el interior hacia el exterior a través de las paredes del horno. Sus dimensiones son de 59 cm de ancho por 84 cm de alto y 44 cm de fondo (figura 1.7).

El sistema de calentamiento de este horno funciona con base en una resistencia eléctrica y un ventilador. Usa un método de control de temperatura on/off. Cuando la resistencia eléctrica se enciende se comienza a calentar el horno (el ventilador es el encargado de llevar el aire caliente a la cámara de secado), se apaga una vez que la temperatura dentro de la cámara de secado llega a la temperatura deseada, cuando la temperatura vuelve a bajar, la resistencia eléctrica se enciende de nuevo y así sucesivamente. El aire caliente que contiene humedad es expulsado por la chimenea de la parte superior del horno.

Este horno utiliza 3 sensores de temperatura del tipo LM35 [18], pero únicamente permite medir una temperatura a la vez. La medición del flujo de aire está basada en un sensor ITR8102 [7], el cual permite medir las revoluciones por segundo del ventilador, con lo que se obtuvo una relación entre las revoluciones y el flujo de aire.

Con este trabajo de tesis se incrementaron las prestaciones del horno de deshidratado de alimentos, sus principales características son:

- Temperaturas de operación:  $\approx 20^{\circ}\text{C}$  a  $75^{\circ}\text{C}$ .
- Cinco niveles de flujo de aire: 0, 0.6, 1.0, 1.2, 1.3 m/s.
- Control de temperatura basado en dos técnicas de control: on-off/PI.
- Control de potencia basado en Triacs y Optoacopladores.
- Modo de operación: local y remoto.

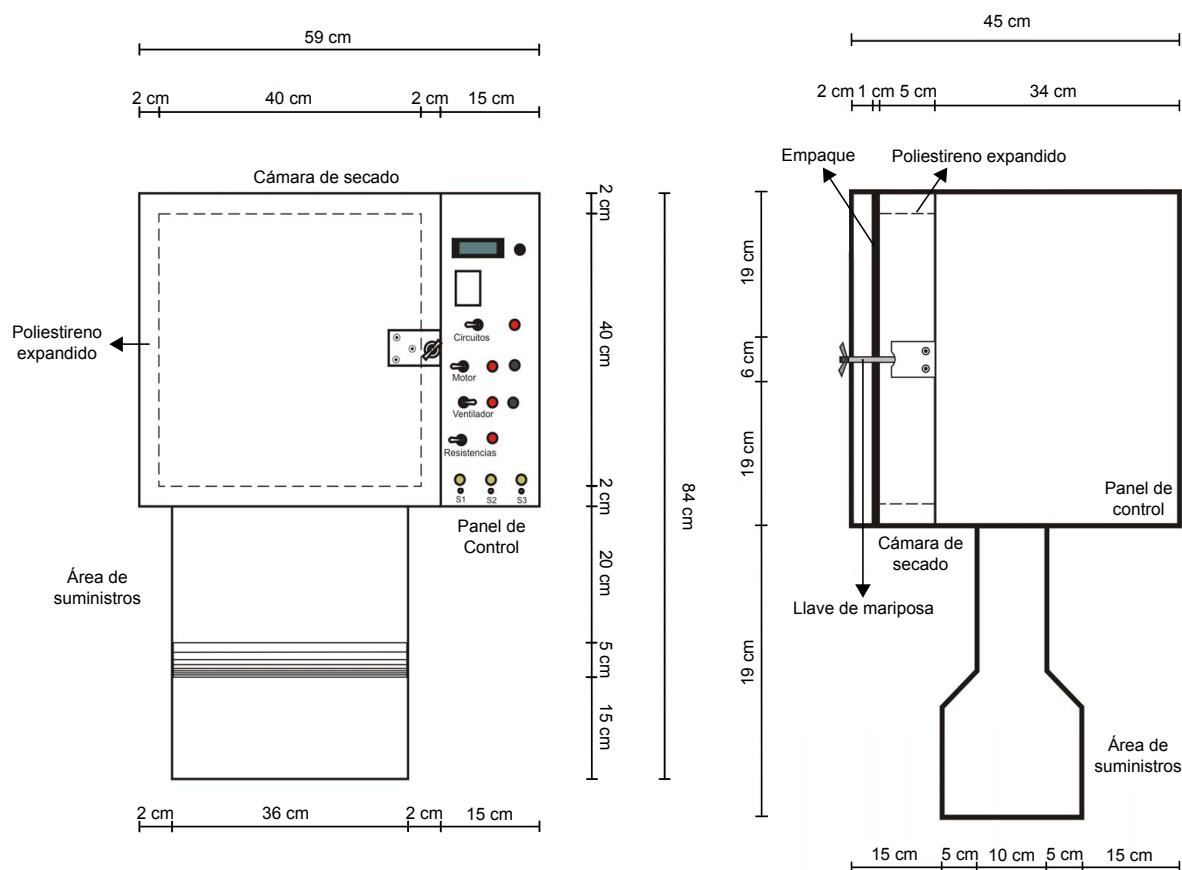


Figura 1.7: Vista Frontal y Lateral del Horno

La hipótesis y los objetivos planteados se describen a continuación.

### 1.3. Hipótesis

Mostrar que con el diseño y construcción del sistema de adquisición de datos y control del deshidratador de charolas giratorias se mejorará el proceso de secado y control de calidad de alimentos, mediante un mejor control de las variables implicadas.

### 1.4. Objetivo General

Mejorar la medición, adquisición y control del horno de secado del Laboratorio de Ciencias Químico-Biológicas del Instituto de Agroindustrias, mediante la actualización del sistema de adquisición de datos y control del mismo; así como controlarlo en forma autónoma o desde una computadora personal.

## 1.5. Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema que permita la manipulación del horno de secado de forma local o remota.
2. Diseñar el módulo para la medición del flujo de aire y temperatura del horno.
3. Diseñar la etapa de potencia para el control de la calefacción, el sistema de extracción de aire y el giro de la charola.
4. Implementar un controlador Proporcional Integral (PI) para la regulación de la temperatura.
5. Diseñar la interfaz de usuario para controlar al horno y registrar las mediciones desde una computadora personal.
6. Crear el circuito impreso del circuito diseñado.

## 1.6. Metas

- 1.1 Diseñar el control local del horno con base en un microcontrolador.
- 1.2 Dotar al sistema de un panel frontal local con display de cristal líquido (LCD) y un teclado como interfaz de entrada y salida para la configuración local.
- 1.3 Realizar en una computadora personal la interfaz que permita configurar y almacenar las variables medidas en el proceso de deshidratado.
- 1.4 Implementar el módulo para la conmutación entre los 2 modos de funcionamiento.
  - 2.1 Seleccionar el sensor y la cantidad de éstos para medir la temperatura.
  - 2.2 Experimentar varias formas de medir el flujo de aire con el fin de seleccionar la que mejor se adapte al sistema.
  - 2.3 Diseñar el subsistema de medición de flujo de aire que permita su interconexión al microcontrolador y la PC.
- 3.1 Diseñar la etapa de potencia para el control de la velocidad de giro de las charolas.
- 3.2 Implementar un control de la potencia de corriente alterna de tipo PWM, para el control de las resistencias calefactoras.
- 3.3 Implementar un control de la potencia de corriente alterna de tipo PWM, para el control de la velocidad del ventilador.



- 4.1 Implementar el algoritmo del controlador PI en el microcontrolador.
- 4.2 Obtener un modelo experimental de primer orden del horno, si es posible.
- 4.3 Sintonizar las ganancias del controlador PI en forma experimental, para regular la temperatura a 50 °C y el flujo de aire a 1.2 m/s.
- 5.1 Diseñar la interfaz de usuario para el monitoreo y control del horno, con base en el lenguaje de programación gráfica Labview.
- 5.2 Crear y desarrollar una interfaz con un menú de configuración, monitoreo y sintonización.
- 6.1 Capturar el diagrama esquemático del hardware de todo el sistema.
- 6.2 Diseñar los circuitos impresos del sistema.
- 6.3 Fabricar las placas, montar los componentes y verificar el correcto funcionamiento.

## 1.7. Contenido de la tesis

El presente documento de tesis está formado por siete capítulos y dos apéndices, estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se realiza una breve explicación acerca del deshidratado de los alimentos; los sistemas para el deshidratado en la industria y en las universidades; y se presentan la hipótesis, objetivos y metas del presente trabajo de tesis.

En el capítulo 2 se realiza una descripción teórica acerca del deshidratado de alimentos, los tipos de secadores y los componentes electrónicos que forman el sistema.

El capítulo 3 muestra la descripción de cada una de las etapas del hardware por el que está compuesto el sistema de control de deshidratado.

En el capítulo 4 se describe la metodología para el desarrollo del hardware empotrado, el cual está implementado en un MCU Atmega16.

En el capítulo 5 se muestra el desarrollo de la interfaz de usuario, se describe cada módulo que fue implementado mediante el software de programación gráfica LabVIEW y cada una de las funciones que tiene la interfaz (Soft-ContHornoPC).

En el capítulo 6 se describen los resultados de hardware y software obtenidos durante las pruebas del sistema (ContHorno).

En el capítulo 7 se mencionan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo de tesis, así como los posibles trabajos futuros para el mejoramiento y robustez del sistema.

En el Apéndice A se describe de manera detallada, la forma en que el usuario debe llevar a cabo la configuración del equipo, dependiendo del modo de operación que se elija (local o remoto).

En el Apéndice B se muestra los diseños de los circuitos impresos, así como fotografías de los pcb's finales del sistema, la lista de componentes y los costos de cada elemento utilizado.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

El secado o deshidratado de alimentos es un proceso que consiste en extraer agua de la superficie de los alimentos y traspasarla al aire circundante hasta que los niveles de agua permitan conservar el producto por cierto tiempo [21].

Los vegetales, como el tomate, pueden ser deshidratados usando diferentes métodos. En el secado de tomates se requiere tomar en cuenta parámetros como: la variedad de tomate, el contenido de sólido soluble del producto fresco, el tamaño de los pedazos de tomate, la temperatura del aire, la velocidad y eficiencia del sistema de secado [16].

Tradicionalmente el secado solar tiene las ventajas de ser simple y económico, pero la desventaja es que se requieren tiempos muy largos para el secado, lo cual trae como consecuencia que el producto se pueda contaminar por polvo e insectos. El secado a temperaturas altas (aproximadamente 90°C) origina la pérdida de calidad, color y aroma del producto; además de provocar la formación de una capa dura en la superficie (llamada encostramiento), lo que impide el deshidratado de la parte interior del producto.

Las condiciones óptimas para el deshidratado de vegetales son temperaturas medias entre 45° y 55° C, y en el caso del tomate, se deshidrata hasta obtener una humedad del producto entre 4 y 7%. Con lo que garantiza que el producto deshidratado retenga sus nutrientes (como vitaminas y licopeno, que es el nutriente responsable del color rojo del tomate) y sabor [16]. En la figura 2.1, se muestra una imagen del tomate fresco y deshidratado.

Los factores más importantes que intervienen en el proceso de secado son: la temperatura del aire, la humedad relativa y el flujo de aire. La temperatura es una variable muy importante a controlar, ya que conforme ésta aumenta el tiempo de secado disminuye, debido a que se acelera la eliminación de la humedad en el producto. La elección de temperatura se lleva a cabo según la composición del alimento a secar. Por ejemplo los alimentos ricos en almidones no deben secarse



Figura 2.1: Desehidratado de Tomate

a temperaturas altas, ya que ocasiona el encostramiento, el cual no permite que toda el agua sea extraída del alimento, por lo que el proceso de secado no es de calidad.

La humedad relativa del aire es importante ya que a medida que la temperatura aumenta, el aire incrementa su capacidad de absorber la humedad extraída de los alimentos y normalmente se expresa en porcentaje (%).

El flujo de aire en el deshidratador tiene dos funciones, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en los alimentos (aire caliente) y transportar la humedad evaporada de los alimentos al exterior. Su importancia radica en que a mayor flujo, mayor es la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado. Pero el flujo de aire también dependerá del tipo de alimento a secar.

## 2.1. Clasificación de los deshidratadores

Con la finalidad de conservar los alimentos, y ya que la humedad es uno de los principales factores que provocan la descomposición de éstos, se han diseñado diferentes deshidratadores de acuerdo al tipo de alimento a secar. Por ejemplo: polvos, vegetales, carnes, granos y frutas.

Existen diversas clasificaciones de deshidratadores, la más general es según el método con el que lleva a cabo la transferencia de calor, que puede ser por conducción, por convección y por radiación. Además, se pueden subdividir según el tipo de contenedor del deshidratador: charolas, tambor, túnel, aspersión, etc.

### 2.1.1. Deshidratadores por convección

Los deshidratadores cuya transferencia de calor es por convección son utilizados para secar alimentos en forma de láminas o pastas. El calor se suministra a través de aire caliente o gas, el cual fluye por la superficie del sólido. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado o gases de combustión directa pueden ser utilizados en sistemas de secado convectivos. Algunos tipos de deshidratadores convectivos son [29]:

- Deshidratador en bandejas o charolas. Funciona con un ventilador que recircula el aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas. También puede usar calor eléctrico.
- Deshidratador de Túnel: Funciona con carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada una; un ventilador extrae aire hacia el exterior.
- Deshidratadores rotatorios. Constan de un pequeño cilindro que gira sobre su propio eje con cierta inclinación. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo de gases calientes mediante un flujo a contracorriente, ó también, puede ser a través de la pared calentada del cilindro.
- Deshidratadores por aspersión. Un líquido se atomiza o rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas, las cuales se evaporan y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. Las partículas obtenidas son porosas y ligeras.

### 2.1.2. Deshidratadores por conducción

Estos son apropiados para alimentos de poco espesor o alimentos con alto grado de humedad. El calor se suministra a través de superficies calientes. Algunos tipos de deshidratadores por conducción son [29]:

- Deshidratadores de tambor. Constan de un tambor metálico caliente que gira, en cuyo interior se evapora una capa delgada de líquido o suspensión hasta secar, después se raspa el sólido.
- Deshidratadores al vacío con anaqueles. Es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles que funciona al vacío. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se usa para materiales sensibles a la temperatura y al oxígeno.

### 2.1.3. Deshidratadores por radiación

Este deshidratado se lleva a cabo mediante radiación electromagnética cuya longitud de onda se encuentra dentro del espectro solar y microondas [29].

Un ejemplo de deshidratador por radiación es el solar, el cual está formado por un gabinete cubierto cuya tapa consta de un material translúcido que deja pasar los rayos solares; de esta manera se utilizan los rayos del sol para lograr la evaporación de la humedad del alimento. Este deshidratador tiene la ventaja que es de bajo costo y las desventajas son que depende de los factores climáticos, el tiempo de secado es muy largo y la capacidad de producción es muy pequeña.

## 2.2. Horno Deshidratador de la UTM

El deshidratador de la UTM descrito en la introducción trae instalado dos calefactores y un ventilador, que son los encargados de generar el aire caliente que se introduce en la cámara de secado, en donde se encuentran instalados los sensores de temperatura, los cuales están distribuidos en diferentes puntos de la cámara para tener información de cómo se comporta la temperatura en diferentes partes de la cámara de secado.

## 2.3. Sensores y Actuadores

Los sensores y actuadores son dispositivos que en combinación con otros elementos permiten a los sistemas interactuar con el medio físico a controlar. La función de los sensores es la de obtener señales eléctricas en respuesta a magnitudes de entrada no eléctricas (temperatura) y por su parte la función de los actuadores es realizar una acción en respuesta a una señal de entrada que puede ser eléctrica, neumática, hidráulica o mecánica [1]. Un transductor es un elemento que convierte energía de una forma a otra; en consecuencia, los sensores y actuadores son considerados transductores [25].

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, en el caso de un elemento para medir temperatura mediante una resistencia eléctrica, la cantidad que se mide es la temperatura y el sensor transforma esta entrada en un cambio en la resistencia. Un transductor se define como un elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado [4]. La diferencia entre sensor y transductor es muy ligera, un sensor realiza una acción transductora y un transductor debe necesariamente sensor alguna cantidad física. En consecuencia, la diferencia radica en la eficiencia de conversión de energía. El propósito de un sensor es detectar y medir, y si su eficiencia es del

5 % o 0.1 % es irrelevante. Un transductor, por el contrario, tiene por objeto transformar la energía y su eficiencia es importante, aunque en algunos casos es posible que no sea alto [25].

Para este trabajo las variables físicas a medir son temperatura y flujo de aire, por lo que a continuación se da una descripción de los sensores que pueden ser empleados para medir dichas variables.

### 2.3.1. Transductores de Temperatura

La necesidad de medir la temperatura se ha superado mediante el uso de transductores. Los cuatro tipos de transductores de temperatura más utilizados son [20]:

- RTD's <sup>1</sup>. Son sensores basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Están contruidos con arrollamientos de hilos finos bobinados entre capas de material aislante y protegido con vidrio o cerámica.
- Termopares. Son sensores formados por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” o unión caliente o de medida y el otro denominado “punto frío” o unión fría o de referencia. Tienen las siguientes ventajas: manejan un rango de temperaturas muy amplio, velocidad de respuesta rápida, fiabilidad, mayor exactitud que los RTD's, etc.
- Termistores. Un termistor es un sensor resistivo de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia de un semiconductor con la temperatura, debido a la variación de la concentración de portadores. Existen dos tipos de termistores, con coeficiente de temperatura negativo (NTC) y con coeficiente de temperatura positivo (PTC). Para los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor, de ahí que el coeficiente sea negativo. Para los termistores PTC, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquirirá propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado.
- Circuitos integrados. Se basan en la sensibilidad a la temperatura de las uniones de silicio. Este tipo de transductores son muy económicos, tienen gran precisión, pero su rango de temperatura es limitado (-40°C a +150°C). En la Figura 2.2 se muestra la fotografía y símbolo del sensor LM35, el cual es un transductor de este tipo, da un voltaje de 10 mv/°C y su etapa de acondicionamiento es muy sencilla.

En la tabla 2.1 se muestran las ventajas y desventajas de los transductores de temperatura.

---

<sup>1</sup>RTD. Resistance Temperature Detector. Detectores de Temperatura Resistivos.

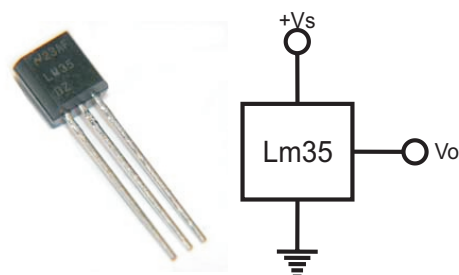

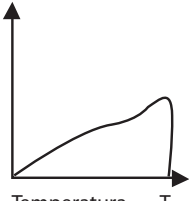

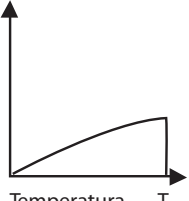

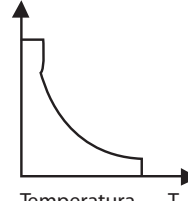

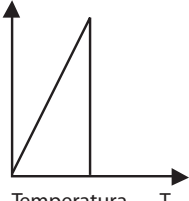


Figura 2.2: Sensor de Temperatura LM35

Tabla 2.1: Ventajas y Desventajas de Transductores de Temperatura

|             | <p>Termopar</p>  <p>V (Voltaje)</p>  <p>Temperatura T</p> | <p>RTD</p>  <p>R (Resistencia)</p>  <p>Temperatura T</p> | <p>Termistor</p>  <p>R (Resistencia)</p>  <p>Temperatura T</p> | <p>Sensor de IC</p>  <p>V o I (Voltaje o corriente)</p>  <p>Temperatura T</p> |
|-------------|--|---|---|--|
| Ventajas    | Autoalineamiento<br>Simple<br>Robusto<br>Económico<br>Amplia variedad de formas físicas<br>Amplia gama de temperaturas   | Más estable<br>Más exacto<br>Más lineal que los termopares  | Salida alta<br>Rápido<br>Medición en dos hilos  | Más lineal<br>Valores altos en su salida<br>Económico  |
| Desventajas | No lineal<br>Bajo voltaje<br>Requiere referencia<br>Mínima estabilidad<br>Menos sensible   | Caro<br>Requiere fuente de alimentación<br>Cambios pequeños de resistencia<br>Baja resistencia absoluta<br>Autocalentable   | No lineal<br>Rango de temperatura limitado<br>Frágil<br>Requiere fuente de alimentación<br>Autocalentable   | Limitado a <250 °C<br>Requiere fuente de alimentación<br>Lento<br>Configuraciones limitadas<br>Autocalentable  |



### 2.3.2. Sensores de Flujo de Aire

Los sensores de flujo de aire son dispositivos que permiten medir el volumen de aire por unidad de tiempo. Una forma de realizar esta medición es bajo el principio básico de un anemómetro, es decir, mediante una turbina cuya hélice gira a una velocidad proporcional al aire que fluye. En la figura 2.3 se muestra una fotografía del anemómetro marca Twilight modelo AVM-07, el cual permite medir flujos desde 0 hasta 45 m/s. Algunas de sus características principales son: mide flujo de aire y temperatura, cuenta con interfaz RS232 y software para comunicación con la PC, mediciones de flujo de aire en diferentes unidades, puede almacenar 2000 mediciones y tiene una resolución de velocidad de aire de 0.01 m/s y precisión de  $\pm 3\% \pm 0,1$ [30].



Figura 2.3: Anemómetro digital Twilight modelo AVM-07

Sin embargo un anemómetro es un instrumento relativamente costoso, el cual tiene restricciones en cuanto a la temperatura a la cual puede operar; ya que estos instrumentos están diseñados para operar a una temperatura máxima entre  $50^{\circ}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ , y debido a que la temperatura máxima del deshidratador es  $75^{\circ}\text{C}$  no es posible utilizar este tipo de instrumento. Una alternativa es medir la velocidad a la cual giran las aspas del ventilador, y con base en ellas estimar el flujo de aire. Otra opción es la relación entre la potencia eléctrica suministrada al ventilador contra el flujo de aire proporcionado por el ventilador.

### 2.3.3. Acondicionamiento de Señal

Los acondicionadores de señal son los elementos o parte del sistema que tiene como función principal transformar la señal eléctrica de salida de un transductor, a una señal que permita ser procesada por el equipo electrónico adecuado. Los acondicionadores de señal son normalmente circuitos electrónicos que ofrecen las siguientes funciones: amplificación, filtrado, adaptación de impedancia, modulación/demodulación, codificación/decodificación, conversión Analógica Digital (ADC) y Digital Analógica (DAC), etc [22].

Por lo general, la etapa de acondicionamiento de señal tiene como función amplificar la señal eléctrica proveniente de los transductores. Esto es necesario debido a que éstos entregan una señal muy pequeña la cual necesita ser amplificada para ser procesada por las etapas de control de los sistemas electrónicos.

Esta función se realiza comunmente mediante amplificadores operacionales, los cuales son dispositivos que pueden ser configurados para realizar distintas funciones como: comparador, seguidor, inversor, sumador, derivador, integrador, etc. Además, estos dispositivos son económicos y pequeños lo que reduce el tamaño y costo de la etapa de acondicionamiento de señal en los sistemas electrónicos (ver figura 2.4).

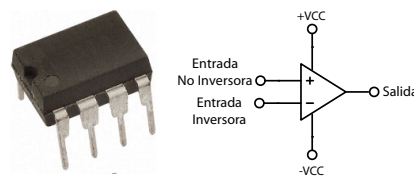


Figura 2.4: Empaquetado de Opam

## 2.4. Sistema de Control

En la actualidad los sistemas de control son muy comunes y están presentes en infinidad de aplicaciones como: lavadoras, elevadores, automóviles, satélites, aviones, robots, etc., pero sobre todo se han vuelto parte importante en los procesos industriales y de manufactura.

Existen dos técnicas de diseño de control analógico y digital. En los últimos años, los sistemas de control digital han sustituido a los controladores analógicos, debido a que con los microcontroladores y las computadoras se pueden diseñar sistemas que resuelven problemas más complejos de regulación y seguimiento, con mejores prestaciones de supervisión, monitorización y tratamiento de información.

Un ejemplo es el sistema de control de temperatura de un horno eléctrico (ver figura 2.5). En el cual, la temperatura se mide mediante un transductor, que entrega una señal analógica, y ésta se convierte a una señal digital mediante un ADC. La temperatura digital se ingresa a un controlador mediante una interface. La temperatura digital se compara con una temperatura que es ingresada mediante un programa y si existe un error, el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interface, un amplificador y un relevador, para hacer que la temperatura llegue al valor deseado [19].

### 2.4.1. Partes de un Sistema de Control de Temperatura

Como se muestra en la figura 2.5, el control consiste en medir la temperatura y, con base en la configuración deseada, aumentar o disminuir la potencia que se le suministra al calefactor. El diagrama a bloques del sistema de control se muestra en la Figura 2.6.

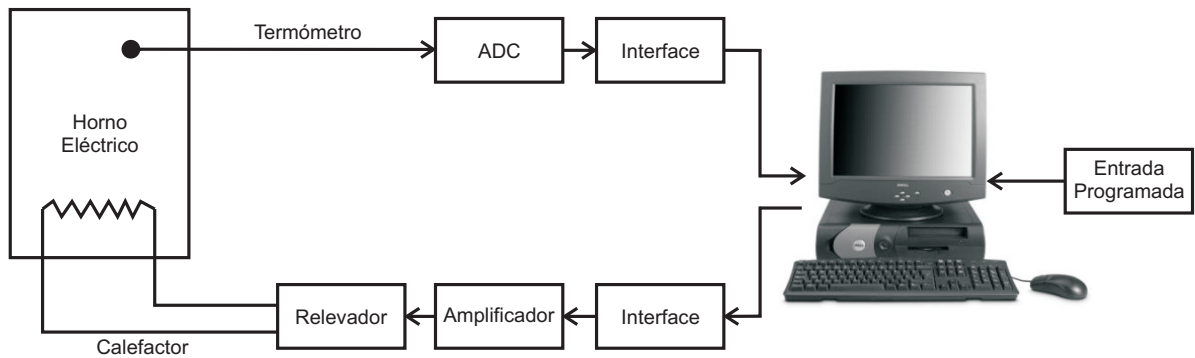


Figura 2.5: Sistema de Control de Temperatura

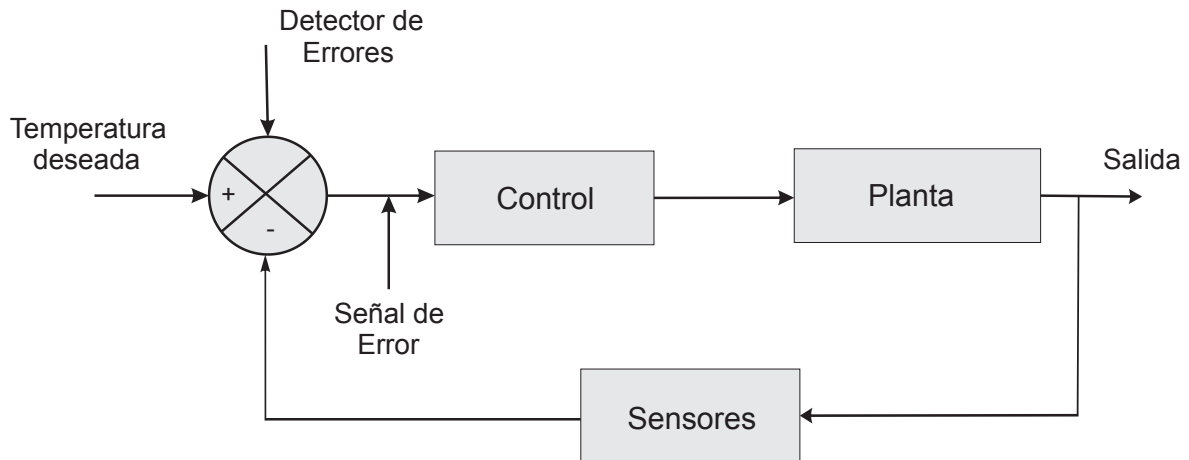


Figura 2.6: Diagrama a bloques de un sistema de control de temperatura

En el caso del horno, el sistema de calefacción funciona con el voltaje de la línea, que es un voltaje de Corriente Alterna (CA) de 120 Vrms y 60 Hz, se consideraron 3 alternativas para variar la potencia del sistema de calefacción, éstas son: variando el ángulo de fase, tipo todo o nada (on/off) y un control tipo integral (control por modulación de ancho de pulso PWM).

### 2.4.2. Control de Potencia: Todo o Nada

En un sistema de control todo-nada, el elemento actuador solo tiene dos posiciones, encendido o apagado. Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial en la que el elemento final de control permanece en su última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. El control todo-nada funciona correctamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Para sistemas de calefacción se tiene un tiempo de retardo grande, lo cual ocasiona que se tengan inercias térmicas elevadas y no se puede tener un control muy preciso de la temperatura [5].

### 2.4.3. Control de Potencia: Por Ángulo de Fase

El control de fase, es un método de control de la potencia promedio de una carga mediante un triac. Este método aplica alimentación a la carga durante una fracción de cada ciclo de CA. En este modo de operación, el triac se mantiene apagado o en condición de apertura por una porción de cada ciclo positivo y negativo, luego es disparado a una condición de encendido por un tiempo que es determinado por el circuito de control. En la condición de encendido, la corriente del circuito está limitada solamente por la carga, es decir, la línea de voltaje entera es aplicada a la carga.

La desventaja principal de utilizar un control de fase en aplicaciones con triacs es la generación de interferencia electromagnética (EMI). Cada vez que el triac se dispara, la corriente de rizo en la carga pasa de cero al valor límite en muy poco tiempo, ésto genera un amplio espectro de ruido el cual puede interferir en la operación de equipo electrónico cercano que no use los filtros apropiados. Para evitarlo, se utilizan técnicas de conmutación forzada como: control del ángulo de extinción, control de ángulo simétrico y control por modulación de ancho de pulso, este último se explicará a continuación.

### 2.4.4. Control de Potencia: Tipo Integral ó PWM

El control de potencia integral o de ciclos enteros es un tipo de control de potencia y se usa principalmente en aplicaciones que tienen una inercia mecánica o térmica alta, como por ejemplo, en el control de velocidad de motores con cargas mecánicas grandes o en hornos industriales [28].

También se llama control por modulación de ancho de pulso (PWM), debido a que el número de ciclos que permanece encendido el calefactor depende del ancho del pulso de la señal. La opción de PWM consiste en tomar un período de 30 ó más períodos de la línea. Posteriormente, la potencia se varía dejando pasar cierto número de ciclos (por ejemplo 6) y se apaga durante 4 períodos, de esta forma se tiene control en la potencia neta aplicada al calefactor. En la figura 2.7 se esquematiza, en forma gráfica, lo antes descrito.

El voltaje de entrada senoidal se describe por la ecuación 2.1, donde  $V(t)$  es el voltaje eficaz,  $V_s$  el voltaje de entrada y  $w$  la frecuencia angular [3].

$$V(t) = \sqrt{2}V_s \text{sen}(wt) \quad (2.1)$$

Si esta señal de voltaje se conecta a una carga resistiva durante  $n$  ciclos, y se desconecta durante  $m$  ciclos, el voltaje eficaz aplicado a la carga se puede calcular como se muestra en la ecuación 2.2:

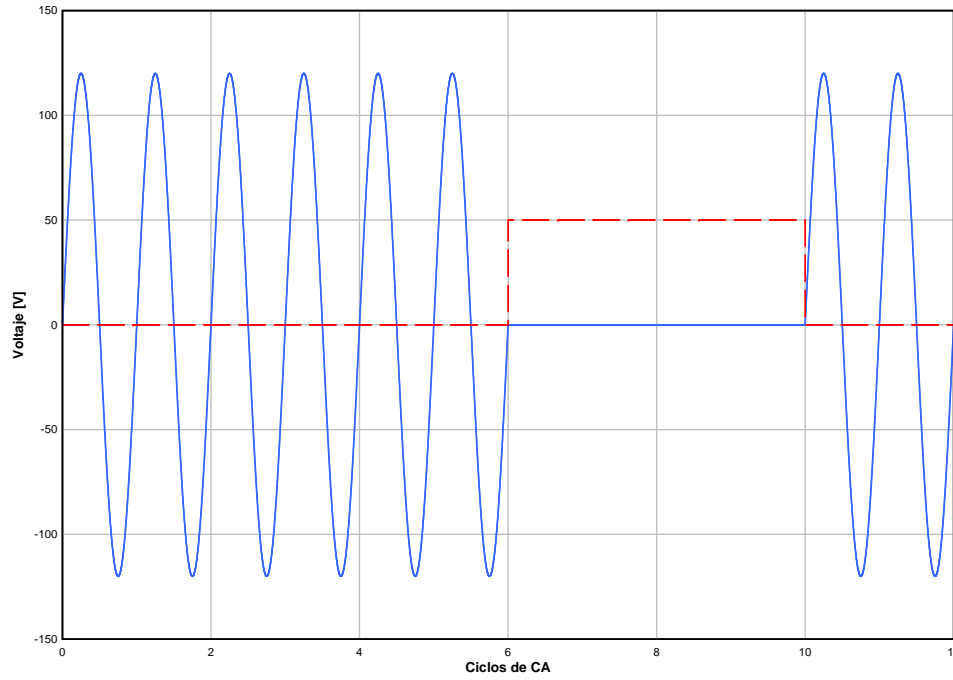


Figura 2.7: Gráfica de variación de pulsos

$$V_o = \sqrt{\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} V_s^2 \text{sen}^2(wt) dt} \quad (2.2)$$

Haciendo manipulaciones algebraicas sobre la ecuación 2.2 se puede demostrar que ésta se puede expresar por la ecuación 2.3.

$$V_o = \frac{n}{n+2} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_s^2 \text{sen}^2(wt) dt} = V_s \sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_s k \quad (2.3)$$

Donde:  $k = \sqrt{\frac{n}{n+m}}$ , se denomina ciclo de trabajo.

De aquí que la potencia que disipa la carga resistiva de  $R$  ( $\Omega$ ), está dada por la ecuación 2.4 y es función de la cantidad de ciclos que esta encendido o apagado y del voltaje eficaz de la fuente de voltaje de CA.

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{(V_s k)^2}{R} \quad (2.4)$$

La figura 2.8 muestra la variación de la potencia en función de  $n$  y  $m$ , con  $R$  de  $50\Omega$ ,  $n+m$  tiene de un valor de 50. Como se puede ver cuando  $n=20$  se tiene una potencia de 46 W, cuando  $n=50$  la potencia es de 287 W, que corresponde a la potencia que disipa la carga cuando permanece conectada a la fuente de voltaje.

Con el control PWM se puede variar la potencia que disipa la resistencia del calefactor y con ello controlar la temperatura en un horno. Por lo tanto se requiere diseñar un controlador que determine la relación de periodos encendidos en función del error de temperatura. Este controlador puede ser de tipo Proporcional Integral (PI) o Proporcional Integral Derivativo (PID).

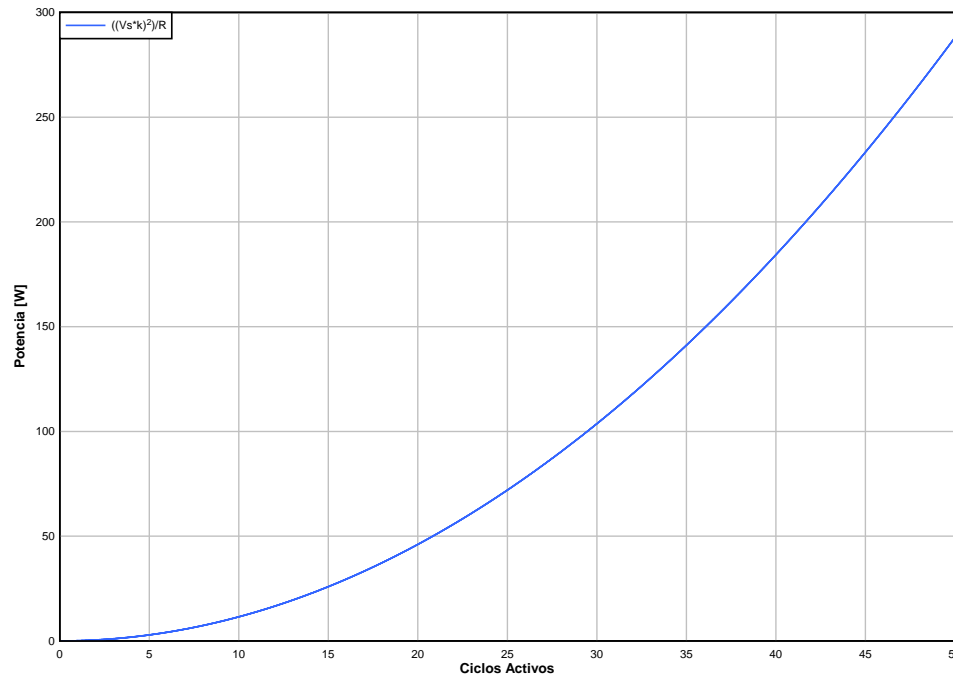


Figura 2.8: Variación de potencia respecto al número de ciclos activos

Independientemente del control de potencia utilizado en el sistema, es necesaria la implementación de un controlador cuya respuesta estará en función del tipo de control de potencia utilizado. Por ejemplo si se utiliza un control de potencia integral la respuesta del controlador estará en función del número de ciclos necesarios para alimentar el calefactor y así regular la temperatura. A continuación se explican dos tipos de controladores.

#### 2.4.5. Controlador Proporcional - Integral (PI)

En la Figura 2.9 se muestra un controlador PI. Este controlador hace que la potencia aplicada a la resistencia del calentador del horno, sea proporcional al error y a la integral de éste. El error se define como la diferencia entre la temperatura deseada ( $T_d$ ) y la temperatura actual de la planta ( $T$ ), lo cual se representa por la ecuación 2.5. Matemáticamente el controlador PI está representado por la ecuación 2.6 [14]. Las constantes  $k_p$  y  $k_i$  controlan la ganancia del controlador, en caso de no conocer el modelo de la planta se estiman experimentalmente o bien empleando el método de Ziegler-Nichols para estimar las constantes.

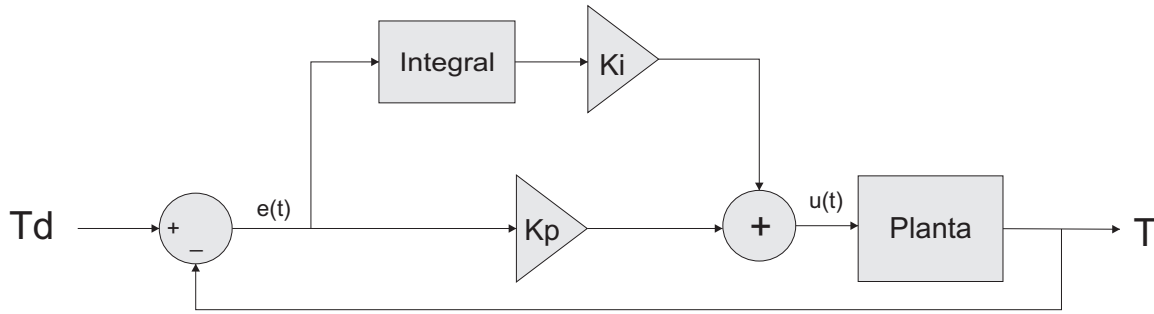


Figura 2.9: Diagrama a bloques del controlador PI

$$e = T_d - T \quad (2.5)$$

$$u(t) = k_p e + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

La implementación analógica de este control en el horno, se puede hacer cuando éste varía el ángulo de fase del voltaje aplicado a la resistencia calefactora del horno. En este trabajo se va a realizar el control de potencia con un control de tipo integral, el controlador PI va a dar el número de ciclos que se van a encender o apagar en función del error (n y m). Hacer esto en forma analógica es complejo, por tal motivo la implementación que se va a hacer es digital.

#### 2.4.6. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

El controlador PI no siempre tiene una buena respuesta para todos los tipos de procesos. Cuando el proceso tiene cambios muy rápidos en la carga, se presentan retardos de tiempo grandes entre la aplicación de la acción correctora y su efecto de dicha acción en la variable medida. En estos casos, la solución puede ser un controlador PID. En la figura 2.10 se muestra el diagrama a bloques de este controlador. Como se puede ver se mantiene el bloque de la integral del error y se le pone un bloque más que realiza la derivada del error.

Matemáticamente el controlador PID se define por la ecuación 2.7, en la cual se observa la parte proporcional, integral y derivada del error. Las constantes  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  se pueden determinar experimentalmente, o usando el método de Ziegler-Nichols.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

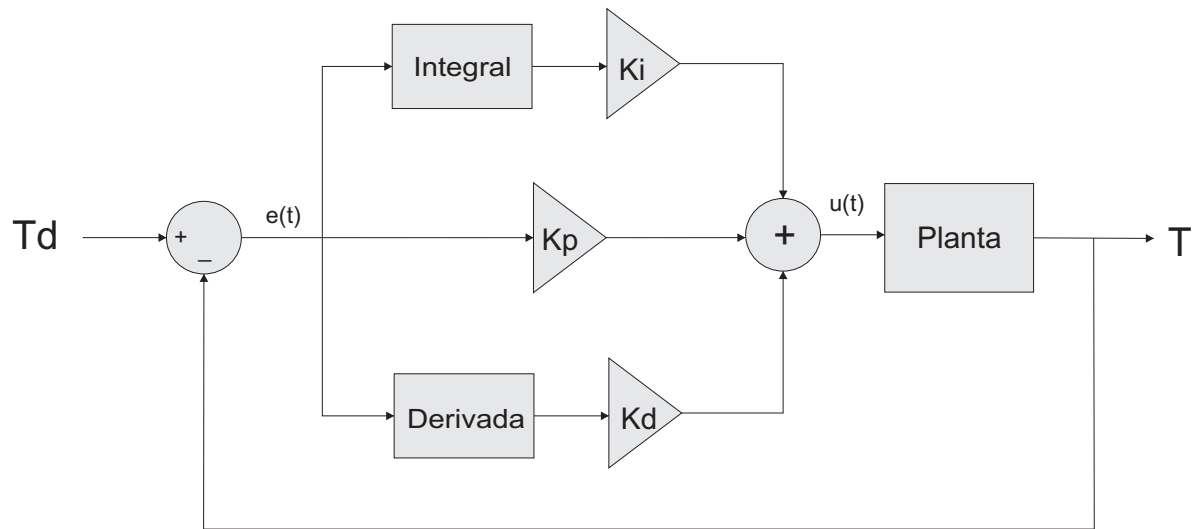


Figura 2.10: Diagrama a bloques de controlador PID

#### 2.4.7. Sintonización del Controlador

Existen diferentes técnicas para la sintonización de controladores, cuando no se cuenta con el modelo de la planta del sistema, una de ellas es el algoritmo de Ziegler-Nichols [13]. De acuerdo a éste, un proceso en lazo abierto puede ser aproximado por la función de transferencia que se muestra en la ecuación 2.8, donde  $T_D$  es el tiempo de retardo,  $K$  la ganancia del sistema y  $T_1$  determina el polo de la función, además es el tiempo en que tardaría el sistema en alcanzar el estado estacionario ante una entrada escalón. Estos valores son encontrados de manera simple en la respuesta al escalón a lazo abierto del proceso que se muestra en la figura 2.11.

$$G(s) = \frac{K e^{-sT_D}}{(1 + sT_1)} \quad (2.8)$$

Después de obtener los valores a través de la gráfica, Ziegler-Nichols sugiere utilizar las ecuaciones de la tabla 2.2 para calcular las constantes  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  del controlador.

Tabla 2.2: Ecuaciones de Sintonización de Ziegler-Nichols

| Controlador | $K_p$                 | $K_i$    | $K_d$    |
|-------------|-----------------------|----------|----------|
| P           | $\frac{T_1}{kT_D}$    |          |          |
| PI          | $\frac{0,9T_1}{kT_D}$ | $3,3T_D$ |          |
| PID         | $\frac{1,2T_1}{kT_D}$ | $3,3T_D$ | $0,5T_D$ |



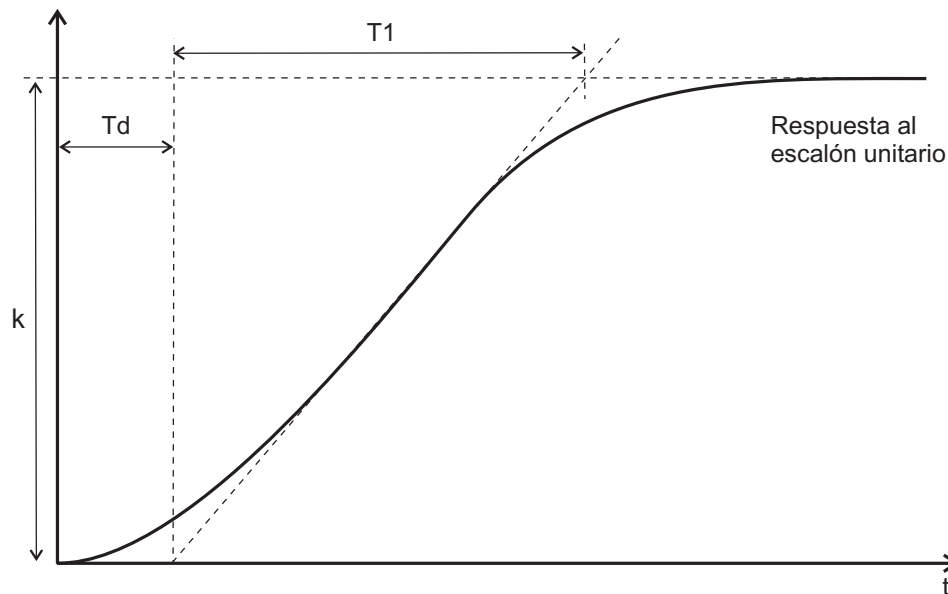


Figura 2.11: Gráfica de la respuesta al escalón del sistema

## 2.5. Etapa de Potencia

En aplicaciones de potencia normalmente la fuente de donde se toma la energía es de corriente alterna (CA). Cualquier sistema de potencia consta de una etapa electrónica que puede ser de tipo analógico o digital, cuyas salidas activan la etapa conectada en la parte de CA. Los dispositivos usados para la conmutación de las cargas están basados normalmente en Tiristores (SCR, TRIACS, etc.), estos dispositivos tienen la capacidad de brindar la corriente necesaria a las cargas, ya sean inductivas o resistivas, que existan en el sistema a controlar.

El manejo de potencia implica tener consideraciones de seguridad tanto para el usuario como para la etapa electrónica del sistema. Para mantener protegida la etapa digital es necesario que exista aislamiento eléctrico entre ésta y la parte de AC. Para ello se interconectan estas dos etapas mediante algún dispositivo que realice esta función. Las alternativas más usuales son los transformadores y los Optoacopladores.

Los Optoacopladores, conectan la entrada con la salida por medio de luz, de esta forma se consigue el aislamiento de hasta 7500 Volts [8]. Existen varios tipos de Optoacopladores como: Optoacopladores con salida a fotodiodo, con salida a fototransistor (SCR), con salida a Darlington y con salida a TRIAC.

En la figura 2.12 se muestra un Optoacoplador con salida a TRIAC y detector de cruce por cero. Cuando el Diodo Emisor de Luz (LED) se polariza directamente emite luz, esta luz sirve como señal de disparo para el Triac, haciendo que pase al estado de conducción. Este tipo

de dispositivos se usa para disparar a su vez un TRIAC con mayor capacidad de corriente. El circuito detector de cruce por cero, hace que el disparo del TRIAC interno esté en fase con el cruce por cero del voltaje de la línea de AC. El diagrama esquemático del circuito de la figura 2.12, corresponde con el del CI MOC3031.

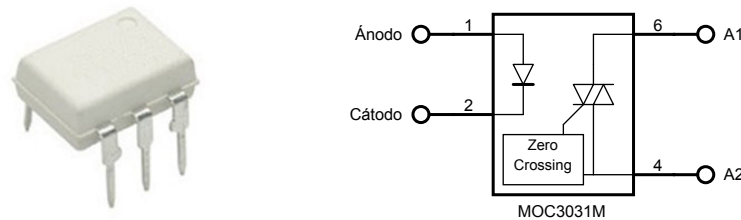


Figura 2.12: Empaquetado y Símbolo de un Optoacoplador

Para conmutar cargas de AC se usan tiristores. Éstos son interruptores electrónicos utilizados en circuitos de potencia donde es necesario controlar la activación del interruptor (ver figura 2.13). Los tiristores forman una familia de tres terminales, entre los que se encuentran: el rectificador controlado de silicio (SCR), el TRIAC, el tiristor de bloqueo por puerta (GTO) y el tiristor MCT o tiristor controlado por MOS (metal-óxido semiconductor). Sus tres terminales son ánodo, cátodo y compuerta. Los tiristores pueden soportar altas corrientes y altas tensiones de bloqueo en aplicaciones de alta frecuencia, pero las frecuencias de conmutación están limitadas a valores entre 10 y 20 kHz.

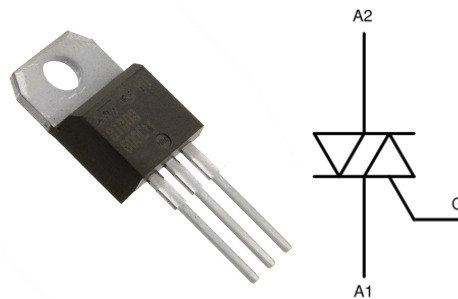


Figura 2.13: Empaquetado y Símbolo de TRIAC

Existen varias formas de disparar un Tiristor, una de las más comunes es con el Optoacoplador, ésto debido a que proporciona el aislamiento entre la etapa digital y la etapa de potencia. En la figura 2.14 se muestra la configuración típica para el disparo de un triac.

El uso de optoacopladores con detector de cruce por cero además de ayudar a aislar la etapa de control con la etapa de potencia, también ayuda a reducir o eliminar la EMI<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>EMI. Electro-Magnetic Interference. Interferencia Electromagnética.

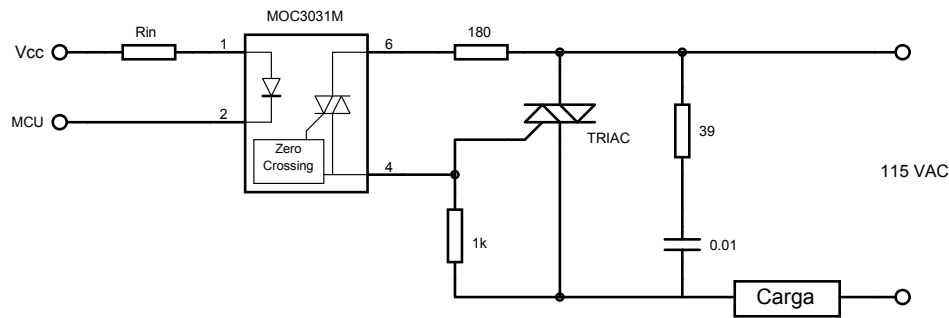


Figura 2.14: Disparo de un Triac mediante un Optoacoplador

## 2.6. Software de Programación Gráfica

Los equipos electrónicos actualmente tienen la ventaja de poderlos interfazar a la computadora, aumentando sus prestaciones significativamente.

En el caso del horno deshidratador, una interfaz con una PC ampliará las características de éste. Algunas de las ventajas que brinda la comunicación del horno con la PC son: gráficas de las variables más importantes del proceso, historiales acerca de las mediciones de las variables durante el proceso, interfaz gráfica amigable con el usuario, etc.

Un lenguaje de programación que permite la realización de interfaces gráficas es LabVIEW, que es una herramienta para pruebas, control y diseño mediante la programación; utiliza lenguaje G, donde la G simboliza que es un lenguaje Gráfico. Este software fue creado por la firma National Instruments en 1976, en la actualidad funciona bajo plataformas como MAC, UNIX, LINUX y WINDOWS [31]. Es utilizado en la industria, algunas de sus aplicaciones son: adquisición de datos, control de instrumentos, automatización industrial, diseño y control de procesos.

En la figura 2.15 se muestra el panel frontal de una aplicación desarrollada en LabVIEW, en la cual se simula un sistema de monitoreo de temperatura. En este sistema se define el límite inferior y superior al que debe permanecer la temperatura, si la temperatura excede el rango superior se muestra una señal visual de alerta; también se realizan una serie de cálculos como la desviación estándar, además de mostrar al usuario la gráfica de temperatura y un histograma.

Un programa en LabVIEW está conformado por dos partes: el panel frontal y el diagrama a bloques. El primero es donde están las entradas y las salidas; y el segundo es donde se realiza el programa. Todas las variables del panel frontal tiene un representación iconográfica en el diagrama a bloques. En la figura 2.16 se muestra el diagrama a bloques del panel frontal.

LabVIEW permite la realización de ciclos, comparaciones, funciones etc., de igual manera que cualquier lenguaje de programación, solo que todas estas estructuras están definidas de manera

gráfica, mediante un icono o bloque. Esta característica hace a LabVIEW una herramienta poderosa para la realización de aplicaciones industriales.



Figura 2.15: Panel Frontal de LabVIEW

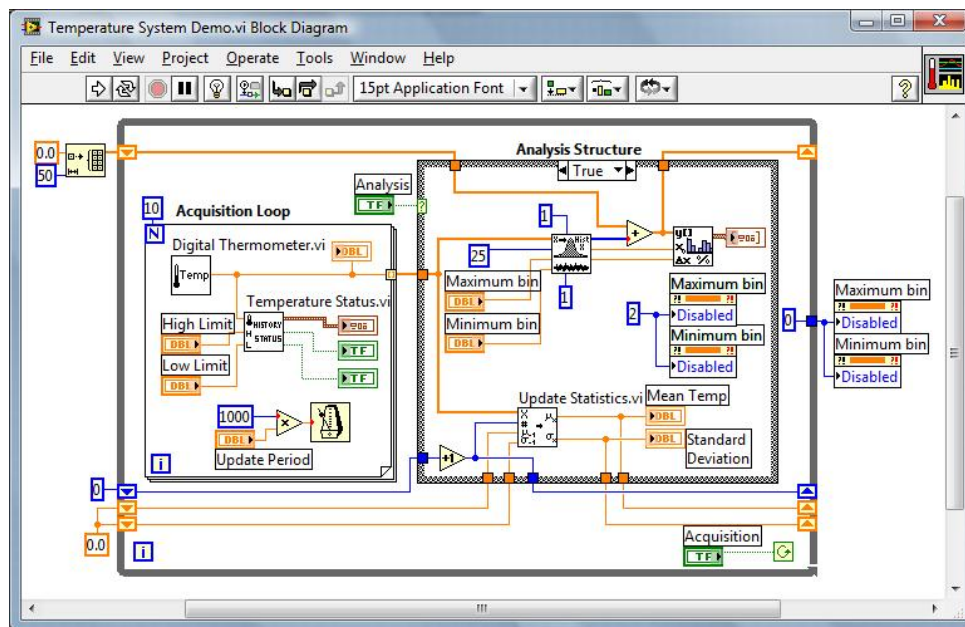


Figura 2.16: Diagrama a bloques de LabVIEW

## Capítulo 3

# Diseño de Hardware

El objetivo principal de la presente tesis, es el diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos y control de un deshidratador de charolas giratorias, mejorando las prestaciones que actualmente posee. Además, el sistema debe permitir el control desde una computadora personal y/o desde el panel frontal del horno. Para llevar a cabo los objetivos propuestos se realizó un sistema basado en el microcontrolador ATmega16 de la compañía Atmel.

Para simplificar e identificar al sistema de control se le llamará ContHorno. Sus características más importantes son:

- Rango de Temperatura: 20° a 75° C.
- Rango de Flujo de Aire: 0 a 1.2 m/s.
- Control de temperatura mediante un controlador PI.
- Control de potencia integral o por modulación de ancho de pulso (PWM).
- Interfaz de usuario mediante panel frontal (LCD y teclado).
- Comunicación vía puerto serial con la computadora personal.
- Interfaz de usuario y monitorización mediante la computadora personal.

### 3.1. Descripción General del Sistema ContHorno

Para llevar a cabo el diseño y construcción del ContHorno, se propone el diagrama a bloques de la figura 3.1. Éste consta de 5 etapas, las cuales son: el horno, la etapa de acondicionamiento de señal, un módulo de procesamiento, interfaz por panel frontal e interfaz mediante una computadora personal. A continuación se describen brevemente.

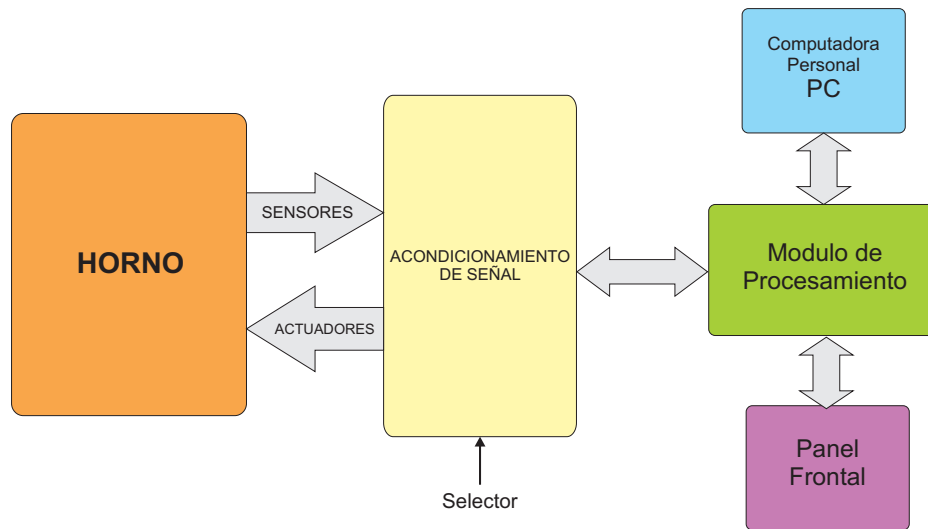


Figura 3.1: Diagrama a bloques del Sistema

- El Horno es donde físicamente se lleva a cabo el proceso de secado, en su interior se tienen los sensores de temperatura y flujo de aire. Así como un ventilador para hacer circular el calor que produce la resistencia del calefactor.
- El Módulo de Acondicionamiento de Señal es el encargado de adaptar las señales provenientes de los sensores para que puedan ser manipuladas por el módulo de procesamiento. También acondiciona la señal de CA para tener un detector de fase y con ello saber el número de ciclos que han transcurrido, y así poder controlar la potencia del calentador y la velocidad del ventilador.
- El Módulo de procesamiento (MP) es el encargado de procesar la información de los sensores y controlar los actuadores. Además, envía y recibe información a la PC y el panel frontal. De esta forma controla la regulación de la temperatura y velocidad del ventilador.
- El Panel Frontal está conformado básicamente por un teclado y un LCD con los cuales el usuario ingresa los datos hacia el módulo de procesamiento.
- La computadora personal permite al usuario configurar las variables del proceso así como su monitoreo. El programa de control está basado en el software de programación gráfica LabVIEW.

En la siguiente figura se muestra detalladamente como está conformado cada uno de los módulos que forman el sistema ContHorno.

En las siguientes secciones se explican cada uno de los módulos en que se dividió el sistema.

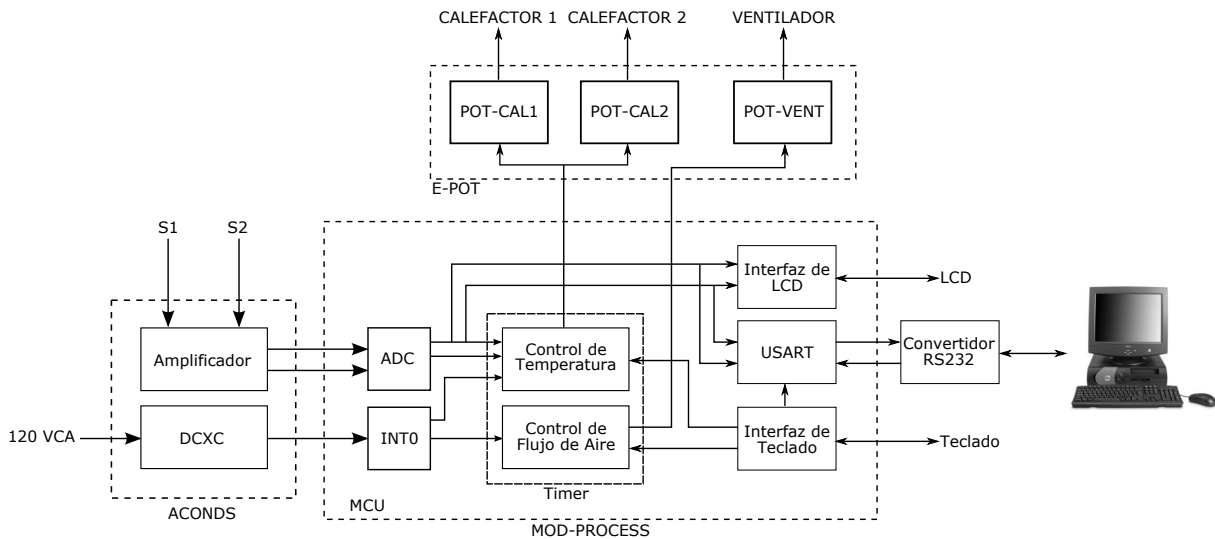


Figura 3.2: Diagrama a bloques detallado del Sistema

## 3.2. El Horno

Durante el desarrollo de esta tesis no se realizaron cambios a la estructura del horno, ya que cumple con los requerimientos del usuario. Además, un cambio en la estructura implicaría un rediseño general del sistema, lo que escapa del objetivo de esta tesis.

La estructura del horno incluye los sensores y actuadores que permiten al sistema llevar a cabo la monitorización y control del proceso. En las siguientes sub-secciones se describen estos dispositivos.

### 3.2.1. Sensores

Los sensores presentes en este sistema son de dos tipos: de temperatura y de flujo de aire. Los sensores de temperatura usados son del tipo LM35, que son circuitos integrados de precisión fabricados por la compañía National Semiconductor, los cuales están clasificados dentro de los transductores integrados. Las características más importantes de este sensor son las siguientes [18]:

- Sensor directamente calibrado en ° Celsius (° C).
- Rango de temperatura de -55° a 150° C.
- Voltaje de salida linealmente proporcional a la temperatura en °C (10 mV/°C).
- Baja impedancia de salida, 0.1 Ω por 1 mA de carga.

- Rango de Operación de 4 a 30 V.
- No-linealidad típica  $\pm 0.25^\circ \text{C}$ .
- Precisión garantizada de  $0.5^\circ \text{C}$ .

La conexión de este sensor es sencilla debido a que en el sistema, el intervalo de temperaturas a medir es desde temperatura ambiente ( $\approx 20^\circ \text{C}$ ) hasta  $75^\circ \text{C}$ . La configuración usada se muestra en la figura 3.3, la cual es proporcionada en las notas de aplicación del fabricante.

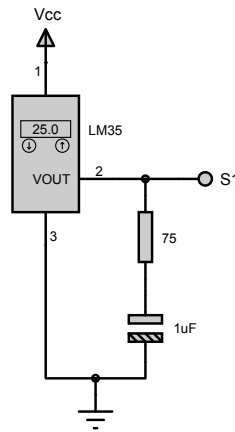


Figura 3.3: Diagrama de conexión del sensor de temperatura LM35

### 3.2.2. Actuadores

El deshidratador de charolas giratorias consta de tres actuadores que modifican su comportamiento, los cuales son: calefactor, ventilador y un motor.

El calefactor se encarga de incrementar la temperatura del aire que entra a la cámara de secado. Este calefactor tiene una resistencia de  $50 \Omega$  y consume una corriente, a plena carga, de 6 A. En la figura 3.4 se muestran los calefactores montados en la estructura del horno.

El ventilador es el actuador encargado de ingresar aire a la cámara de secado. Éste tiene un consumo de 0.5 A y una potencia de 48 W a plena carga. El montado del ventilador en la estructura se muestra en la figura 3.4.

El motor es el actuador encargado del giro de las charolas en el interior del deshidratador y tiene como objetivo homogenizar el secado. En la figura 3.4 se muestran las charolas rotadas por el motor. El cual es un motor de CA, cuyo voltaje de alimentación es 120 V y tiene una caja de engranes para reducir el giro del motor de manera que las charolas giren a una velocidad moderada.



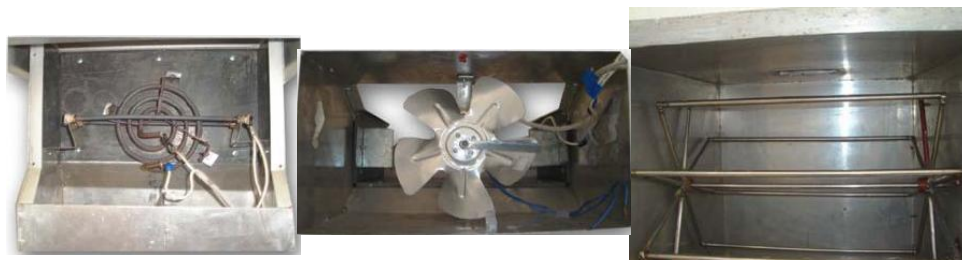


Figura 3.4: Calefactor, Ventilador y Charolas del horno

### 3.3. Etapa de acondicionamiento de señal

La etapa de acondicionamiento es la encargada de adaptar y acondicionar las señales provenientes de los sensores. Es decir, les da el nivel de voltaje y corriente adecuado para que puedan ser interpretadas por el módulo de procesamiento, de tal manera que los actuadores funcionen correctamente.

Esta etapa tiene 3 funciones: acondicionamiento de señal, que básicamente se encarga de amplificar las señales de los sensores; el selector tiene como función elegir el modo de operación del horno (local o remoto); y la etapa de potencia brinda la energía necesaria a los actuadores. En la figura 3.5 se muestra el diagrama a bloques. A continuación se describen las funciones por separado.

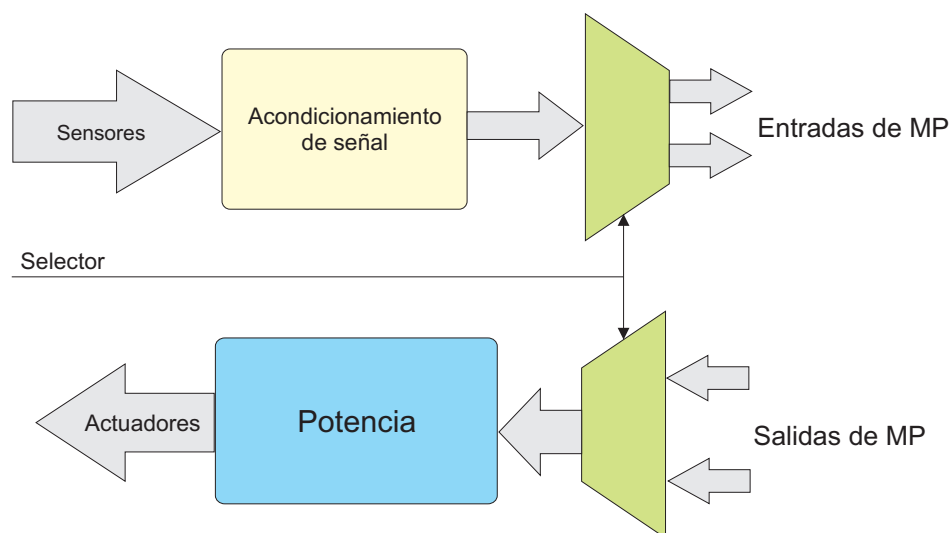


Figura 3.5: Diagrama a bloques de la etapa de acondicionamiento de señal

### 3.3.1. Sección de acondicionamiento de señal

Esta sección es la encargada de amplificar o acoplar las señales provenientes de los sensores de tal manera que a su salida tengan un nivel de voltaje mayor o niveles TTL para que puedan ser analizados por el módulo de procesamiento correctamente.

#### Acondicionamiento de sensores de temperatura

Considerando que el LM35 tiene una salida de  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  y el ADC usado tiene una resolución de  $50 \text{ mV}$ , se propone amplificar 5 veces la señal del sensor, con lo cual la resolución aumenta a  $50 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  mejorándose la medición. El error del ADC es de  $\frac{1}{2}$  LSB, por lo que se tendría un error de  $\frac{1}{2} ^\circ\text{C}$  en la medición.

La amplificación de las señales de los sensores LM35 se realiza con un amplificador operacional de baja potencia, bajo offset y que trabaja con una sola fuente de alimentación. El OPAM LM358 cumple con estas características, consta de 2 amplificadores como se muestra en la figura 3.6 [18].

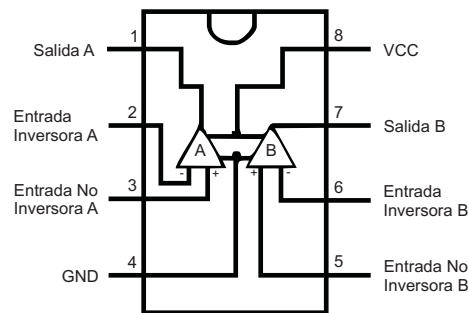


Figura 3.6: Pines del CI LM358

Se utilizó el OPAM en modo de amplificador no inversor, para evitar una inversión de la polaridad. Para realizar los cálculos se utiliza la ecuación 3.1. Por lo que con  $R_1=1\text{k}\Omega$  y  $R_2=4\text{k}\Omega$  se obtiene una ganancia de 5, es decir  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 5$ . En la figura 3.7 se muestra el diagrama de conexión del amplificador diseñado.

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.1)$$

Debido a que la resistencia de  $4 \text{ k}\Omega$  no es comercial, se usa un potenciómetro de precisión (trimpot) para obtener una buena calibración en la ganancia del amplificador.

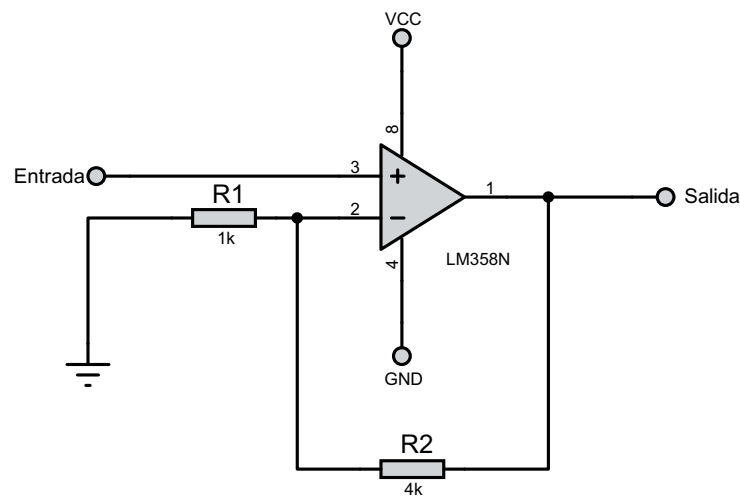


Figura 3.7: Diagrama de conexión de amplificador no inversor

### Detector de Cruce por Cero

Otra función de la etapa de acondicionamiento es generar una señal que esté en fase con los ciclos de corriente alterna, la cual está pasando por la red de alimentación. Éste se lleva a cabo con un detector de cruce por cero, que se diseñó con un rectificador de onda completa, un transformador con derivación central y un transistor como interruptor. En la figura 3.8 se muestra el diseño de esta etapa.

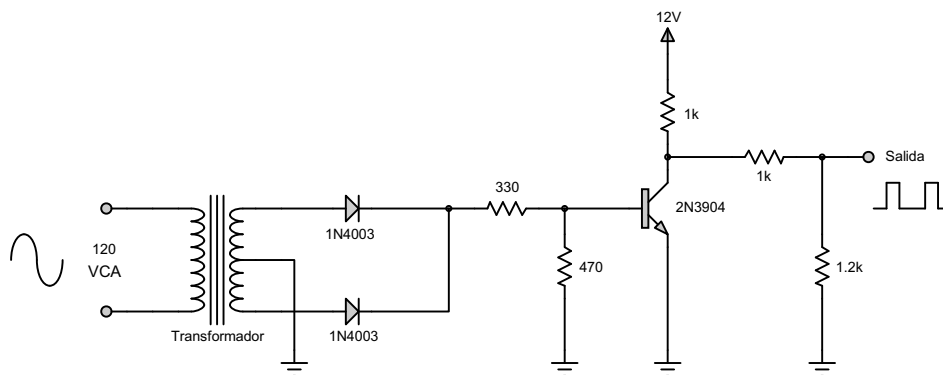


Figura 3.8: Diagrama de conexión de detector de cruce por cero

El funcionamiento de este circuito es el siguiente: el transformador es el encargado de reducir el voltaje de la red de 120 V a 6 V, después esta señal pasa por un rectificador de onda completa, con el objetivo de quitar los picos negativos de la señal de CA. Esta señal pasa por el transistor de manera que, cuando la señal es mayor al voltaje de ruptura del transistor (0.7 V) este se

cierra y a la salida se tiene 0 V, pero cuando la señal es menor al voltaje de ruptura el transistor permanece abierto teniendo a la salida 5 V.

De esta forma se tiene un pulso de 5 V cada que hay un cruce por cero del voltaje de la línea, es decir, por cada ciclo se van a tener dos pulsos. En la figura 3.9 se muestra la simulación de lo antes dicho, en la cual se observa el pulso positivo cada que hay un cambio de polaridad en el voltaje de la línea.

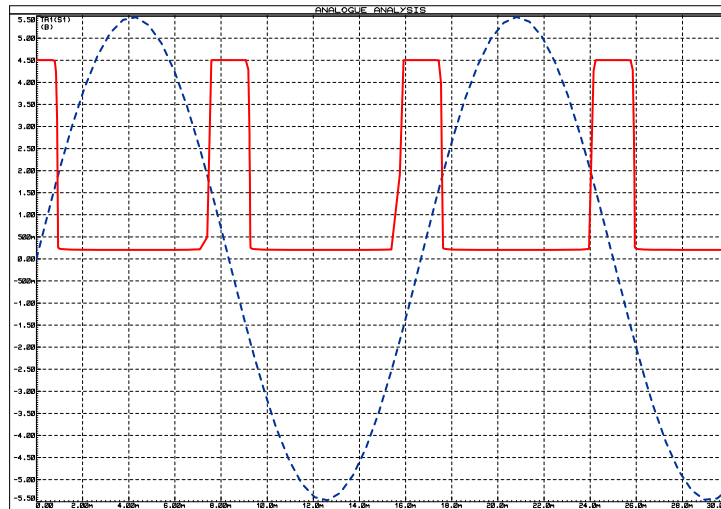


Figura 3.9: Simulación de detector de cruce por cero

### 3.3.2. Sección de Selección

Esta etapa es la encargada de elegir el modo de funcionamiento del sistema, en modo local o remoto. La selección se lleva a cabo mediante el uso del panel frontal (LCD y teclado). Durante la configuración del proceso se visualiza en el LCD un mensaje para elegir el modo de operación; para seleccionar el modo local se presiona '1' y para el modo remoto '2'. Dependiendo de la selección se realizará la activación y desactivación de la comunicación con la PC vía software.

### 3.3.3. Sección de Potencia

Esta etapa es de mucha importancia, ya que es la encargada de brindar a los actuadores del horno la energía necesaria para su correcto funcionamiento, además de aislar la etapa de control mediante el uso de optoacopladores con detector de cruce por cero.

El control de potencia de CA usado para el funcionamiento del calefactor y el ventilador consiste en encender y/o apagar los actuadores mediante el uso de TRIACS, los cuales son controlados mediante una señal proveniente del microcontrolador (del módulo de control) que indica el número de ciclos durante el cual el TRIAC dejará pasar la señal de CA al actuador.

Debido al tipo de control de potencia usado, los optoacopladores con detector de cruce por cero además de ayudarnos a garantizar que el TRIAC sea habilitado durante ciclos completos y cuando la señal de CA cruce por cero, también beneficiará en la reducción o eliminación de transitorios de encendido y EMI . Por otra parte también es importante agregar una red de snubber para reducir la tasa de voltaje de rizo en las terminales del triac, en el caso del control del ventilador. En la figura 3.10 se muestra el circuito empleado.

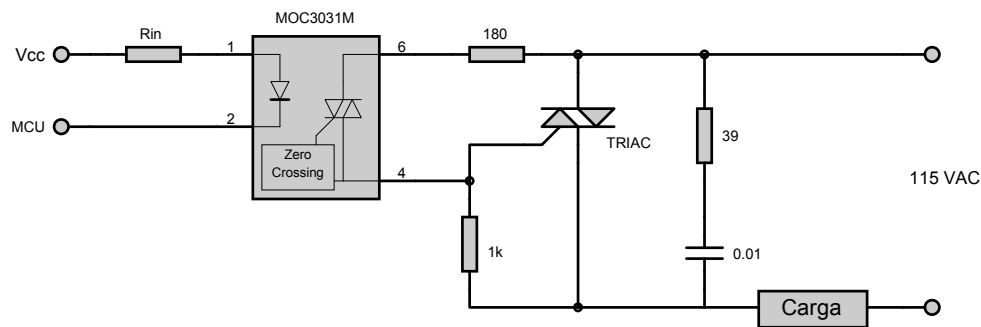


Figura 3.10: Circuito de Potencia para los Actuadores

El funcionamiento de esta sección es la siguiente: cuando la carga debe encenderse el microcontrolador manda una señal en bajo que activa el optoacoplador, y éste activa al TRIAC (y a la carga) en el siguiente cruce por cero. Cuando el microcontrolador manda una señal en alto (5V) el diodo del optoacoplador no conduce y la salida del optoacoplador no se activa, por lo que la carga permanece apagada.

En la figura 3.11 se observa la simulación del circuito de la figura 3.10. Las gráficas que se muestran corresponden a la señal de disparo (señal verde) y el voltaje en la carga (señal roja). Cuando el disparo está en bajo (durante 3 ciclos enteros), el triac es activado y cuando está en 5V, el triac no conduce.

### 3.4. Módulo de Procesamiento

El módulo de procesamiento es el encargado de llevar a cabo el control de todas las funciones del sistema. Éste recibe las señales del módulo de acondicionamiento, envía las señales de activación al módulo de potencia, controla al panel frontal y las comunicaciones con la computadora. Está basado en el microcontrolador Atmega16L de la compañía Atmel (ver figura 3.12). Las características más importantes de este microcontrolador son las siguientes [2]:

- Microcontrolador de 8 bits.
- Arquitectura RISC.
- 16k Bytes de memoria flash con 10,000 ciclos de Lectura/Escritura.

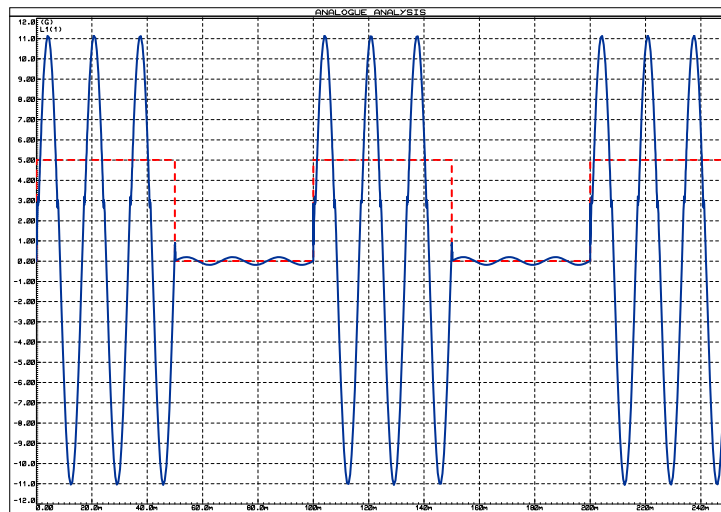


Figura 3.11: Simulación de etapa de Potencia



Figura 3.12: Microcontrolador Atmega16L

- 512 Bytes de memoria EEPROM con 100,000 ciclos de Lectura/Escritura.
- Reloj interno y configurable.
- 32 líneas de entrada/salida programables.
- Convertidor Analógico Digital de 10 bits con 8 entradas multiplexadas.
- 4 canales de PWM.
- Interfaz Serial USART.
- Interfaz TWI.
- Interfaz SPI maestro/esclavo.
- Protocolo JTAG.
- Voltaje de alimentación: 2.7-5.5V
- Velocidad de 0-8 MHz.

- 40 pines.

La mayor parte del módulo de procesamiento está desarrollado mediante el firmware que tiene empotrado (el cual será explicado en el siguiente capítulo). El diagrama de conexión de este módulo con los controles del panel frontal se muestran en la figura 3.13.

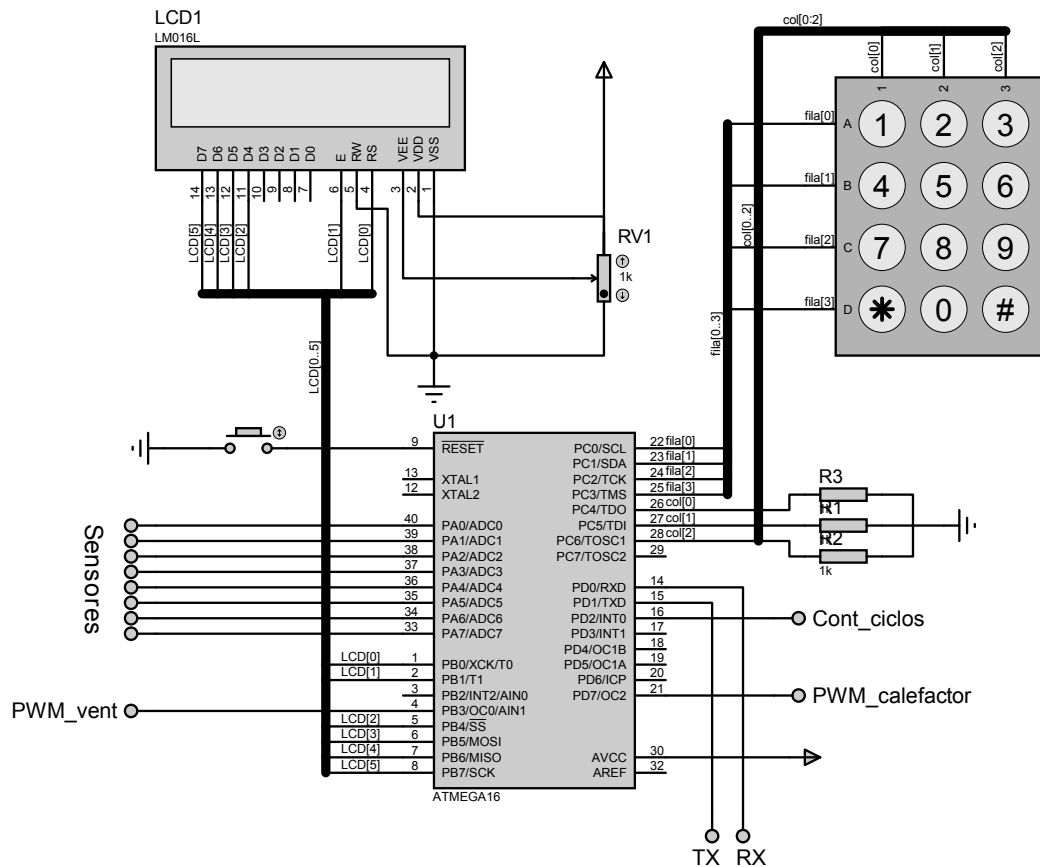


Figura 3.13: Diagrama de Conexión de microcontrolador y periféricos

### 3.5. Interfaz con la computadora

La comunicación con la computadora se realiza mediante una interfaz serial usando la USART del microcontrolador. Este periférico tiene tres señales: recepción, transmisión y tierra con niveles TTL. Para que se conecte al puerto RS232 de la PC es necesario adaptar los niveles de voltaje entre ambos estándares. Para esto se usó el circuito integrado MAX232 que se encarga de esta función y cuya configuración se muestra en la figura 3.14 [24].

En esta aplicación no se van a utilizar las señales para el control de flujo de datos por hardware, por lo que solo se usan las líneas de Transmisión (Tx), Recepción (Rx) y tierra (GND).

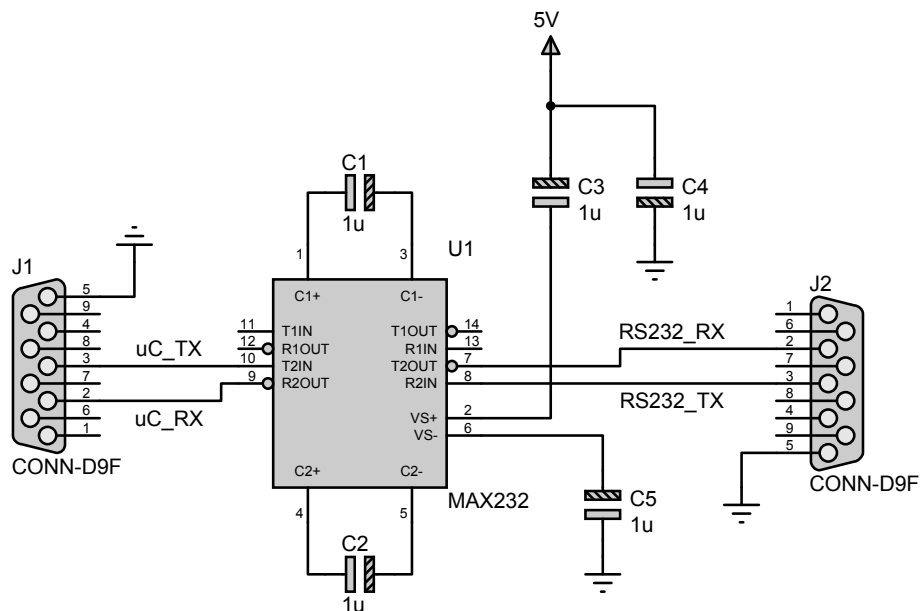


Figura 3.14: Configuración de CI MAX232

### 3.6. Panel Frontal

El panel frontal del horno estará conformado por un LCD, un teclado y un switch. Mediante el teclado el usuario ingresa la configuración de temperatura y el flujo de aire deseados, éstos son procesados por el microcontrolador. En el LCD se despliega el dato que se está ingresando, cuando el horno está en modo de configuración y cuando está en operación despliega las temperaturas actuales tomadas por los diferentes sensores. El switch tendrá como función habilitar o deshabilitar la interfaz con la computadora.

El display de cuarzo líquido (LCD) usado, consta de 2 líneas y 16 columnas y tiene el controlador HD44780U (ver figura 3.15). Sus características más importantes son [12]:

- Caracteres de 5x8 o 5x10 puntos.
- Interfaz de 4 o 8 bits.
- Generador de caracteres ROM.
- Generador de caracteres RAM.



- Amplio rango de funciones: limpiar, regresar cursor, encendido/apagado de display, encendido/apagado de cursor, caracteres parpadeando, cambio de cursor y cambio de display.
- Oscilador interno.
- Bajo consumo de energía.



Figura 3.15: LCD 2x16

El teclado usado es un teclado matricial de 4x3 empleado en algunos teléfonos (ver figura 3.16).



Figura 3.16: Teclado matricial de 3x4

El switch utilizado como selector de modo de funcionamiento, ya sea en modo remoto o modo local, es del tipo un polo un tiro y se muestra en la figura 3.17.



Figura 3.17: Interruptor tipo palanca



## Capítulo 4

# Diseño de Software Empotrado

El software juega un papel muy importante en el funcionamiento del ContHorno ya que se encarga de coordinar todas las funciones del horno y del procesamiento de la información desde la PC. En forma funcional el programa (Soft-ContHorno) se divide en 2 partes que son el programa para el microcontrolador (Soft-ContHornoMC) y el programa para la PC (Soft-ContHornoPC).

En este capítulo se explica la forma en que se diseñó cada uno de los módulos del Soft-ContHornoMC, el cual se codificó para el microcontrolador AVR mediante lenguaje C. Una de las razones más importantes por las que el Soft-ContHornoMC se desarrolló mediante lenguaje C, es porque se requieren hacer cálculos con números flotantes para la implementación del controlador PI, que sería más complejo de realizar mediante lenguaje ensamblador.

En el siguiente capítulo se explica el diseño del Soft-ContHornoPC, el cual se desarrollo bajo el ambiente de programación gráfica LabVIEW, por tener funciones especiales para aplicaciones de instrumentación. En este capítulo solo explicará la forma en que se hizo el Soft-ContHornoMC.

### 4.1. Modelo de Desarrollo

La implementación del Soft-ContHorno se basa en el modelo de desarrollo evolutivo el cual se enfoca en el hecho de que el software al igual que todos los sistemas complejos evoluciona con el tiempo [26]. Los modelos evolutivos permiten desarrollar versiones de software cada vez más completos. El modelo evolutivo usado es el incremental, el cual se basa en la entrega de avances pequeños pero funcionales de manera que cada vez el software quede más completo [26]. La figura 4.1 esquematiza el proceso de desarrollo del modelo evolutivo incremental, las fases que lo compone son:

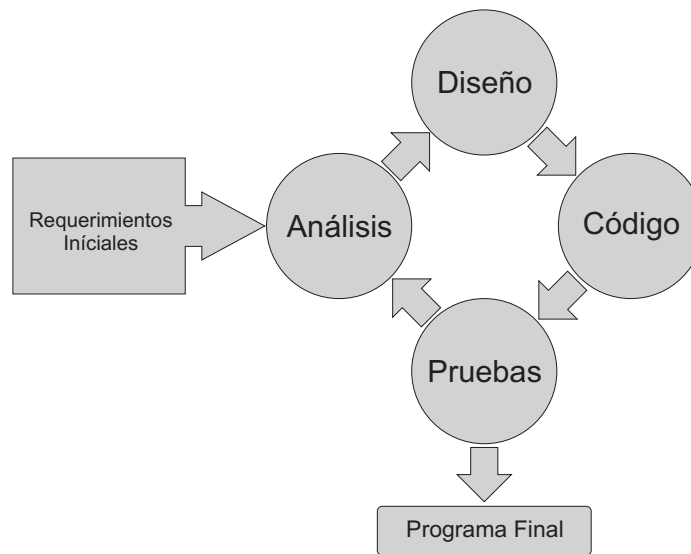


Figura 4.1: Esquema del modelo evolutivo incremental

- **Análisis de requisitos:** consiste en la comprensión de la naturaleza de los programas a construirse, la función requerida, comportamiento, rendimiento e interconexión.
- **Diseño del sistema:** se centra en proporcionar la funcionalidad del sistema a través de sus diferentes componentes. En cuanto más detallada se realice esta etapa más fácil será la etapa de codificación.
- **Codificación:** consiste en llevar el diseño a un lenguaje que pueda ser interpretado por una computadora o por un microcontrolador.
- **Pruebas:** una vez terminada la codificación se inician las pruebas del programa con el fin de verificar que se cumplan los requerimientos del usuario. De no ser así se obtienen los nuevos requerimientos para comenzar otra vez el ciclo hasta que se obtenga un software completo que satisfaga todas las necesidades del usuario.

## 4.2. Especificación de Software

El Soft-ContHorno tiene como función principal regular la temperatura y el flujo de aire de manera que la deshidratación de alimentos pueda realizarse con la mejor calidad posible. La mayor parte de este proceso es realizado mediante el Soft-ContHornoMC cargado en un microcontrolador de la familia AVR de Atmel Company.

Los requerimientos del Soft-ContHornoMC son:

- El usuario podrá seleccionar entre dos modos de funcionamiento: modo local y modo remoto.
- En el caso del modo de funcionamiento local, el usuario podrá ingresar datos de temperatura y flujo de aire mediante el uso de un teclado matricial, además de desplegar dichos datos en un LCD de 2x16.
- Monitoreo de las variables físicas implicadas en el proceso (temperatura y flujo de aire) y su despliegado en LCD.
- Implementación de un controlador PI y ON/OFF, para el control de la temperatura del deshidratador.
- Implementación de un control por ciclos enteros para el control de flujo de aire.
- Implementación de la activación y desactivación del giro de las charolas.
- En el caso del modo de funcionamiento remoto, implementación de comunicación serial para la transmisión y recepción de datos de monitoreo y configuración del deshidratador mediante la PC.

### 4.3. Análisis de Software

El Soft-ContHorno tiene como función principal llevar a cabo el control de temperatura y flujo de aire de un deshidratador de charolas giratorias, además de proporcionar al usuario dos modos de funcionamiento: modo local y modo remoto. Mediante el Soft-ContHornoMC se cubre por completo el funcionamiento del modo local, el cual consiste en la configuración y monitoreo del proceso por parte del usuario mediante el panel frontal y el control de temperatura y flujo de aire; además de realizar la comunicación con la PC para llevar a cabo la configuración y monitoreo del proceso en modo remoto.

El análisis del Soft-ContHornoMC se llevó a cabo de forma modular como se puede observar en la figura 4.2. El programa se dividió en los siguientes bloques: módulo de pre-inicialización, módulo de configuración local, módulo de configuración remoto, módulo de inicialización, módulo de control del proceso y módulo de comunicación serial. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

#### 4.3.1. Módulo de Pre-inicialización

El módulo de pre-inicialización es el encargado de configurar los puertos de I/O del microcontrolador, así como configurar el ADC para realizar la lectura de la temperatura inicial,

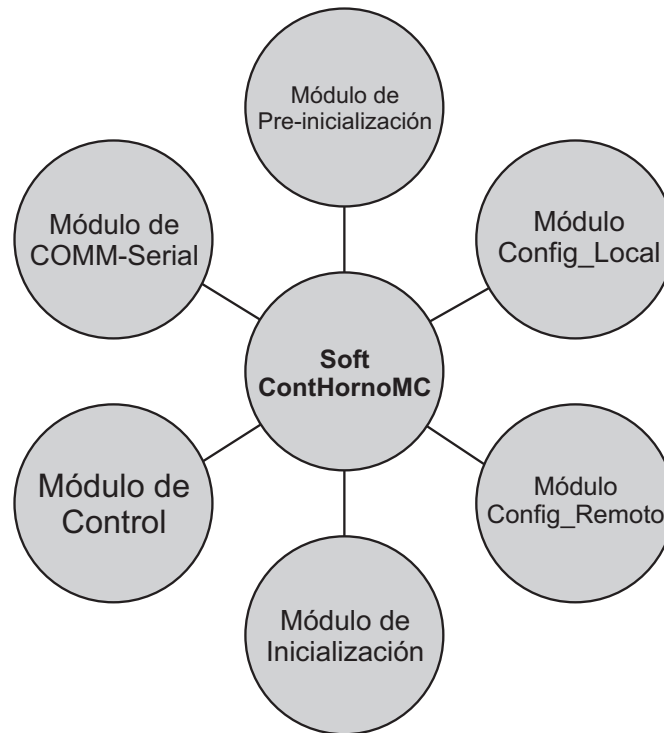


Figura 4.2: Módulos de Soft-ContHornoMC

desplegar los primeros mensajes y datos, y llevar a cabo la lectura del modo de funcionamiento elegido por el usuario.

#### 4.3.2. Módulo de Configuración Local

El módulo de configuración local entrará en operación cuando el usuario haya seleccionado el modo de funcionamiento local desde el panel frontal. Este módulo tiene como función la captura y desplegado de los datos ingresados por el usuario desde el panel frontal del deshidratador, el cual está compuesto principalmente por un teclado matricial y un LCD.

#### 4.3.3. Módulo de Configuración Remoto

El módulo de configuración remoto entrará en funcionamiento cuando el usuario haya seleccionado este modo de operación desde el panel frontal. Este módulo tiene como función la inicialización de la USART del microcontrolador y la recepción de los datos de configuración del proceso, por medio de una comunicación serial, que el usuario ingresa desde la computadora personal.

#### 4.3.4. Módulo de Inicialización

El módulo de inicialización tiene como función inicializar todos los periféricos que se utilizan durante el control de proceso, como lo son: el ADC, el Timer/Counter y la Interrupción INT0. Además en este módulo se define el número de ciclos durante los que va a estar activo el ventilador para arrojar el nivel de flujo de aire seleccionado por el usuario.

#### 4.3.5. Módulo de Control de Proceso

El módulo de control de proceso es el módulo principal del Soft-ContHornoMC y se ejecuta de manera continua. Éste tiene como función el control de temperatura del deshidratador mediante un controlador ON/OFF-PI, además de llevar a cabo la adquisición de la temperatura actual y el monitoreo de forma local mediante el despliegado de los datos en el LCD y de forma remota mediante el módulo de comunicación serial. Para realizar sus funciones este módulo hace uso de periféricos como: el ADC, el Timer/Counter y la INT0.

La función más importante de este módulo es el control de la temperatura, el cual está formado por dos tipos de control, el control ON/OFF y el control PI. Este controlador será del tipo ON/OFF cuando la temperatura este muy por debajo de la temperatura requerida y será tipo PI cuando la temperatura del deshidratador esté próxima a la temperatura requerida. Esto con el fin de eliminar rizados de temperatura grandes, como los que se presentan al implementar únicamente el control ON/OFF.

#### 4.3.6. Módulo de Comunicación Serial

El módulo de comunicación serial entra en funcionamiento únicamente cuando el usuario selecciona el modo remoto para operar el deshidratador. Tiene como función la transmisión de información del microcontrolador a la computadora personal mediante el puerto serial.

### 4.4. Diseño de Soft-ContHornoMC

En esta sección se muestra el diseño de los algoritmos mediante los cuales se codifica el Soft-ContHornoMC. Para esto se utilizan herramientas como diagramas de flujo y pseudocódigo.

De manera general el funcionamiento del Soft-ContHornoMC puede ser descrito mediante el diagrama de flujo de la figura 4.3. Las variables y su descripción ocupadas en los diagramas de flujo y pseudocódigos se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Descripción de variables utilizadas en Soft-ContHornoMC

| Variables | Descripción  |
|-----------|--|
| SEL       | Selección de modo de funcionamiento                      |
| RXC       | Bandera de recepción de UART                             |
| numteclas | Número de teclas oprimidas                               |
| ON_OFF    | Bandera de selección del tipo de controlador             |
| ciclos1   | Contador del No. de ciclos en nivel bajo                 |
| ciclos2   | Contador del No. de ciclos en nivel alto                 |
| PWM1      | No. de ciclos en nivel bajo calculado por el controlador |
| PWM2      | No. de ciclos en nivel alto calculado por el controlador |
| ta1       | Temperatura actual del sensor 1                          |
| ta2       | Temperatura actual del sensor 2                          |
| td        | Temperatura deseada                                      |
| ti        | Temperatura inicial                                      |
| Faire     | Flujo de aire  |
| bctrl     | Byte de control de comunicación serial                   |

#### 4.4.1. Módulo de Pre-Inicialización

Este módulo tiene las siguientes funciones:

- Inicializar los puertos del microcontrolador para que sirvan como entrada o salida. El puerto A se usa como entrada al ADC. El puerto B se usa como E/S para realizar la interfaz con el LCD. El puerto C se configura como E/S para conectar el teclado matricial. El puerto D sirve como E/S para la UART y las salidas de control. En la figura 3.3 se muestran los registros de configuración de puertos; mediante los registros DDRX se configura si los pines de un puerto son entradas o salidas y con los registros PORTX se activan las resistencias pull-up con el fin de eliminar los rebotes y así asegurar un estado lógico alto o bajo según sea el caso.
- Configurar el ADC para que realice la conversión de la temperatura inicial del deshidratador. Las entradas del ADC se encuentran en el puerto A.
- Inicialización del LCD.
- Despliegue de la temperatura inicial.
- Lectura del pin de selección del modo de funcionamiento del deshidratador (local o remoto).



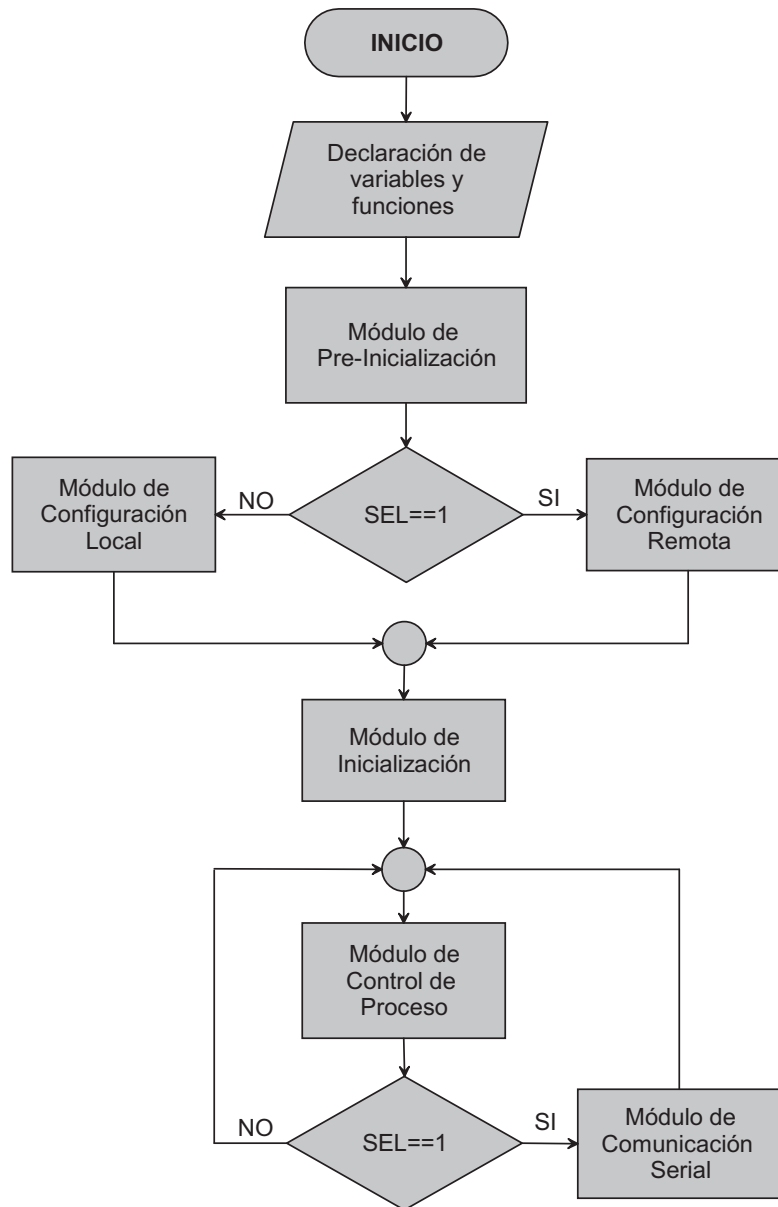


Figura 4.3: Diagrama de Flujo General del Sistema

En la figura 4.4 se muestran los registros utilizados para configurar los puertos como E/S y para activar las resistencias pull-up. Los bits sombreados en los registros DDRX indican que están configurados como salidas y para los registros PORTX indican que las resistencias pull-up están activadas en esos bits.

|       |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| DDRA  | DDA7   | DDA6   | DDA5   | DDA4   | DDA3   | DDA2   | DDA1   | DDA0   |
| DDRB  | DDB7   | DDB6   | DDB5   | DDB4   | DDB3   | DDB2   | DDB1   | DDB0   |
| DDRC  | DDC7   | DDC6   | DDC5   | DDC4   | DDC3   | DDC2   | DDC1   | DDC0   |
| PORTC | PORTC7 | PORTC6 | PORTC5 | PORTC4 | PORTC3 | PORTC2 | PORTC1 | PORTC0 |
| DDRD  | DDD7   | DDD6   | DDD5   | DDD4   | DDD3   | DDD2   | DDD1   | DDD0   |
| PORTD | PORTD7 | PORTD6 | PORTD5 | PORTD4 | PORTD3 | PORTD2 | PORTD1 | PORTD0 |

Figura 4.4: Configuración de E/S del microcontrolador

#### 4.4.2. Módulo de Configuración Remota

El módulo de configuración remota tiene como función la recepción de los datos, introducidos por el usuario desde la PC, por medio de la UART. A grandes rasgos este módulo realiza lo siguiente: inicializa la UART del microcontrolador para recepción y transmisión de datos. Cuando recibe el carácter de control (desde la PC) transmite la temperatura inicial del deshidratador y después se reciben los datos, desde la PC, para la configuración del proceso. La información recibida únicamente será válida si el primer byte recibido coincide con el byte de control antes definido. Este módulo hace uso del módulo de comunicación serial descrito más adelante. En la figura 4.5 se muestra el diagrama de flujo que describe de manera general a este módulo. En una sección posterior se explica con más detalle el formato de las tramas.

#### 4.4.3. Módulo de Configuración Local

El módulo de configuración local tiene como función el ingreso de datos (temperatura deseada y flujo deseado) por parte del usuario mediante un teclado matricial, así como el despliegue de éstos en un LCD. La interfaz con el teclado matricial se logra mediante un barrido continuo entre filas y columnas, con lo cual se logra detectar la tecla que se oprimió. El teclado está conectado en el puerto C del microcontrolador donde se usan cuatro pines como salidas y tres como entradas, así como las resistencias pull-up para eliminar rebotes. En la figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo de este módulo.

#### 4.4.4. Módulo de Inicialización

El módulo de inicialización tiene como objetivo principal la configuración de flujo de aire del ventilador según el valor introducido por el usuario. Además de llevar a cabo la inicialización y configuración de todos los periféricos que serán usados durante el proceso de control. En la tabla 4.2 se muestran los periféricos, los registros y los valores con los que se configuran y una breve descripción de la función de cada registro.

La configuración del flujo de aire se realiza de manera fija de modo que durante todo el proceso de deshidratado se conserve este valor. Esta configuración se realiza mediante un control

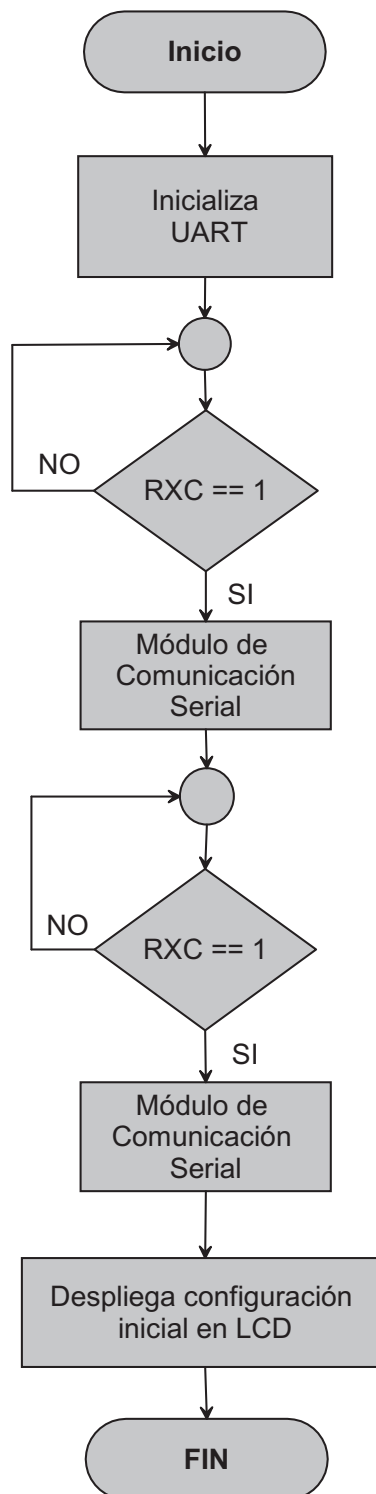


Figura 4.5: Diagrama de flujo de módulo de configuración remota

por ciclos, es decir, el ventilador estará activo durante un cierto número de ciclos de CA y dependiendo del número de ciclos activo es el flujo de aire obtenido, por lo que previamente se

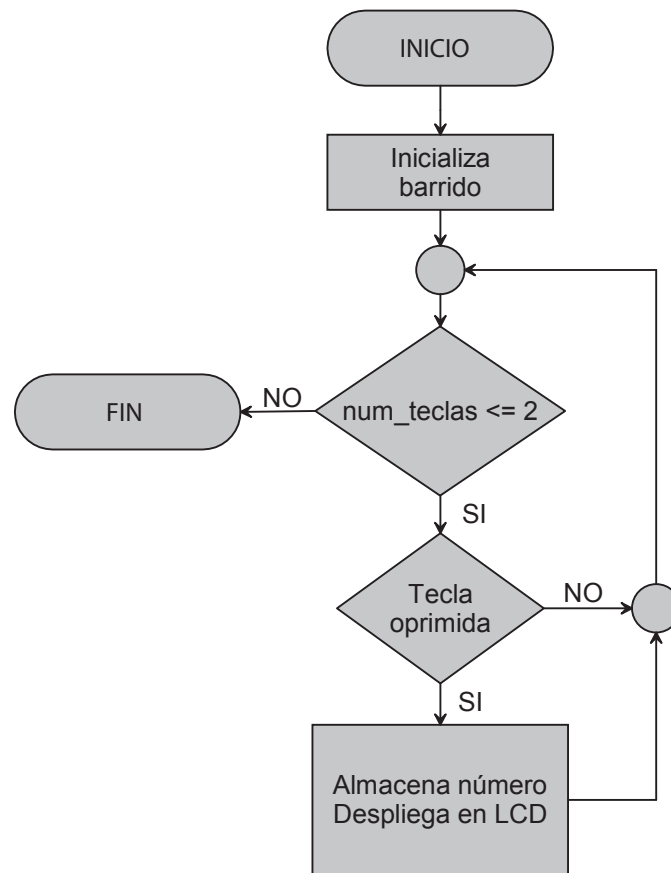


Figura 4.6: Diagrama de flujo de módulo de configuración local

realizó una tabla que relaciona el número de ciclos con el flujo de aire [m/s]. El usuario puede elegir entre cinco niveles de flujo de aire y en la tabla 4.3 se muestra la calibración obtenida.

En la figura 4.7 se muestra el diagrama de flujo que describe el módulo de inicialización, en el cual se muestra como dependiendo del nivel de flujo de aire seleccionado por el usuario (faire), se hace la lectura de dos localidades de la EEPROM. La primera indica el número de ciclos que el ventilador estará activo y este valor quedará asignado durante todo el proceso de deshidratado. La segunda localidad es el flujo de aire en m/s cuyo valor será desplegado para fines de monitoreo.

#### 4.4.5. Módulo de Control del Proceso

El software que realiza el control del proceso de deshidratado se elaboró atendiendo las interrupciones producidas por los diferentes periféricos tales como: los TIMERS, el ADC, la UART y la INT0.

Tabla 4.2: Configuración de Periféricos

| Periférico | Registro | Valor [hex] | Descripción                                       |
|------------|----------|-------------|---|
| ADC        | ADCSRA   | 0xCB        | Habilita el ADC y selecciona la preescala del ADC |
|            | ADMUX    | 0x40, 0x41  | Selecciona el canal del ADC a convertir           |
| Timer 1    | TCCR1A   | 0x00        | Configura el modo de operación del timer          |
|            | TCCR1B   | 0x04        | Configura la preescala del timer                  |
|            | TCNT1H   | 0xF3        | Parte alta de cuenta actual                       |
|            | TCNT1L   | 0xCA        | Parte baja de cuenta actual                       |
| INT0       | GICR     | 0x40        | Habilita interrupciones externas                  |
|            | MCUCR    | 0x03        | Configura el modo de activar las interrupciones   |
| UART       | UBRRH    | 0x00        | Configura la velocidad de comunicación            |
|            | UBRRL    | 0x0C        |   |
|            | UCSRA    | 0x02        | Configura la velocidad doble de transmisión       |
|            | UCSRB    | 0x98        | Habilita la recepción y transmisión de datos      |
|            | UCSRC    | 0x86        | Configura la forma de la trama                    |

Tabla 4.3: Calibración de Flujo de Aire

| Nivel de Flujo de Aire | Flujo de Aire<br>[m/s] | No. de Ciclos |
|------------------------|------------------------|---------------|
| 1                      | 0                      | 0             |
| 2                      | 0.6-0.7                | 6             |
| 3                      | 1.0                    | 8             |
| 4                      | 1.2                    | 14            |
| 5                      | 1.3                    | 20            |

En la tabla 4.4 se muestran las prioridades de las interrupciones utilizadas y una breve descripción de su activación siendo la de prioridad 1 la que se ejecuta primero. Entonces si se ejecutan dos interrupciones al mismo tiempo, primero se ejecuta la de mayor prioridad y al finalizar se ejecuta la otra y las que hayan ocurrido durante la atención de la interrupción, ya que todas ellas son guardadas para su posterior ejecución según su prioridad.

La función principal del Soft-ContHornoMC es controlar la temperatura del deshidratador y esto se hace implementando un controlador. Estos cálculos se realizan cada 0.8 segundos por lo que en el módulo de inicialización se configuró el Timer1 para que cada 0.8 segundos aproximadamente ocurra una interrupción y se realicen todos los cálculos.

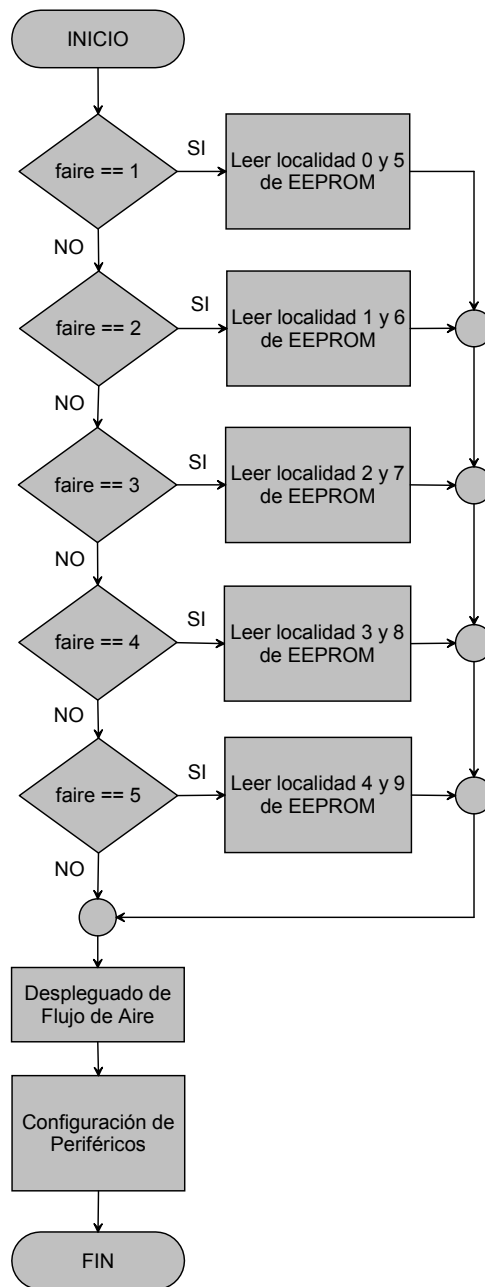


Figura 4.7: Diagrama de flujo del módulo de inicialización

Para llevar a cabo el control, también se necesita conocer el comportamiento de la temperatura y esta se obtiene al leer el canal 0 y 1 del ADC. Esta lectura se realiza cada vez que se produce una interrupción efectuada por el Timer1, es decir cada 0.8 segundos.

Cuando el usuario selecciona el modo de funcionamiento remoto es necesario que durante todo el proceso se transmitan los datos procesados por el MCU que muestran la variación de la temperatura hacia la PC, para esto se utiliza la UART. Un dato será transmitido después que

el MCU reciba un byte de control de la PC, es decir solo se transmitirán datos una vez que se sepa que la PC esta lista para recibir un dato nuevo.

La INT0 es utilizada para contar los pulsos provenientes del detector de cruce por cero ya que conocer el numero de ciclos de CA que pasan por la red de alimentación es necesario para llevar a cabo un control integral o control por ciclos.

Tabla 4.4: Tabla de prioridad de interrupciones

| Prioridad | Interrupción      | Descripción   |
|-----------|-------------------|---|
| 1         | RESET             | Cuando se genera un flanco de bajada en el pin de reset del MCU se genera una interrupción que reinicializa el programa                               |
| 2         | INT0              | Se genera la interrupción cuando existe un flanco de bajada, subida o ambos en el pin INT0 del MCU  |
| 9         | TIMER1<br>OVF     | Se genera una interrupción por overflow cuando el contador del timer llega a su cuenta máxima   |
| 12        | USART RXC         | Se genera una interrupción por recepción cuando la bandera RXC se activa debido al almacenamiento de un nuevo dato en el buffer de entrada de la UART |
| 15        | ADC<br>Conversion | Se genera una interrupción por el ADC cuando se ha realizado una conversión analógico/digital de la señal de alguno de los canales del ADC            |

### Contador de ciclos

Para realizar un control por ciclos o integral es necesario conocer el número de períodos de la línea de CA, de tal manera que se mantenga encendida o apagada la carga en función de éstos. La interrupción 0 detecta los flancos de subida del detector de cruce por cero, y con ello lleva la cuenta de cuantos ciclos han transcurrido. En esta misma interrupción se determina si se enciende o apaga la carga en función de la configuración proveniente del controlador. En la figura 4.8 se muestra el diagrama de flujo que describe las acciones realizadas cuando se produce esta interrupción.

### Temporizador (Timer1)

La temperatura del deshidratador es regulada con la implementación de un controlador PI el cual debe ser recalculado cada 0.83 segundos aproximadamente, por lo cual es necesario el

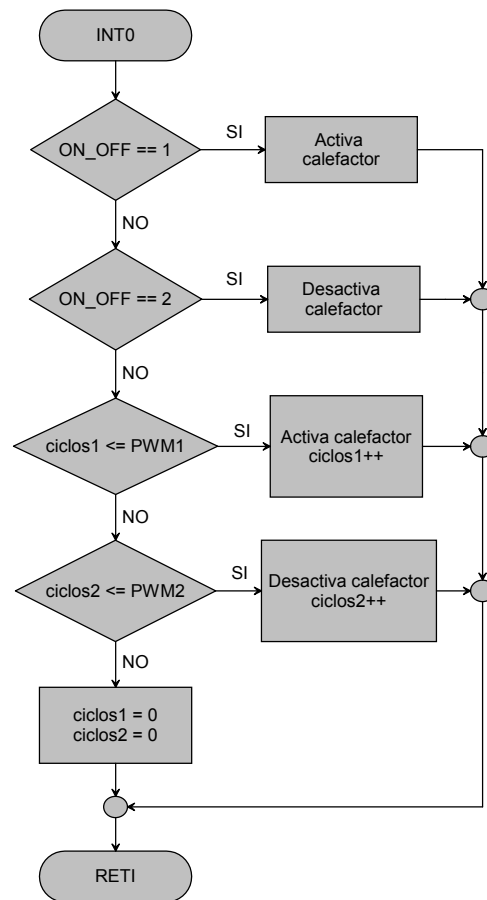


Figura 4.8: Diagrama de flujo de INT0

uso de un temporizador para que cada 0.83 segundos se produzca una interrupción y así poder realizar los cálculos. Esto se implementa con el Timer/Counter1 del MCU. En la figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo con las acciones realizadas cuando se produce una interrupción.

## Controlador PI

En aplicaciones donde es necesario el control de la salida del sistema debido a los cambios en los valores de referencia o estado, es conveniente la implementación de un algoritmo de control. Ejemplo de este tipo de aplicaciones es el control de temperatura, el cual puede ser solucionado mediante la implementación de un controlador PI. En la figura 4.10 se muestra el diagrama a bloques general del sistema ContHorno con un controlador PI.

El controlador PI compara entre el valor medido ( $y$ ) y el valor deseado ( $y_0$ ). La diferencia o error ( $e$ ) es procesado para producir el valor de la nueva entrada para el sistema con el fin de llegar al punto deseado.



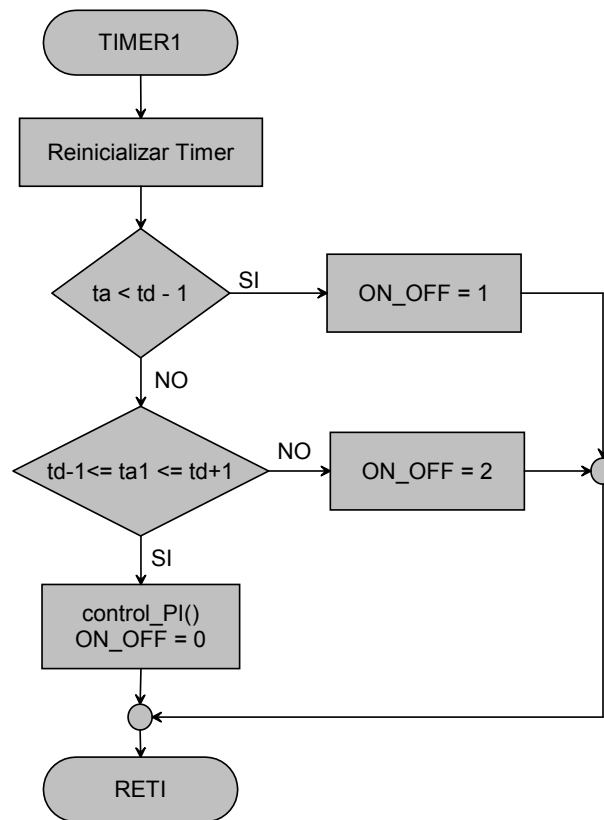


Figura 4.9: Diagrama de Flujo del Timer1

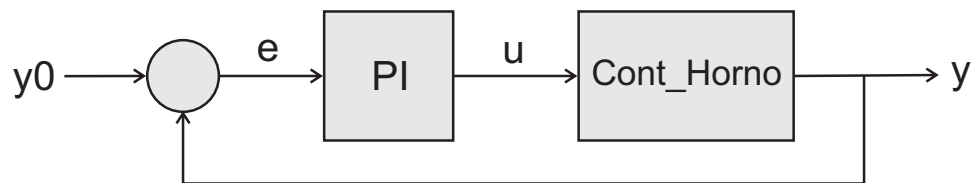


Figura 4.10: Sistema a lazo cerrado con controlador PI

La idea básica para implementar un controlador de temperatura mediante un microcontrolador AVR es capturar la temperatura actual mediante el ADC interno. Este dato es restado a la temperatura deseada con lo cual se obtiene el error y este valor es procesado mediante un controlador PI. El término proporcional da como resultado una entrada proporcional al error (manejo del presente) y mediante el término integral se adiciona un valor proveniente de la suma de los errores previos (el pasado), con lo que se obtiene una respuesta sin error estacionario.

La respuesta obtenida por el controlador PI está en función al número de ciclos durante el cual estará activado el calefactor. Con lo cual se logra un control por ciclos, el cual es calculado por el controlador PI.

El controlador PI puede describirse por la ecuación 4.1:

$$PWM = k_p * e + k_i * \int_0^t e(t)d(t) \quad (4.1)$$

donde:

$k_p$ : Constante proporcional [pulsos/°C]

$K_i$ : Constante integral [pulsos/°C]

$e$ : Error [°C]

El error es definido como una substracción entre la temperatura deseada y la temperatura actual (ecuación 4.2). La integral del error es definida como el área bajo la curva en el intervalo anterior ( $A_{k1}$ ) más el producto del error por el tiempo de muestreo ( $e * t_s$ ) (ecuación 4.3), ésta es calculada mediante el método de sumas de Riemann que se muestra de forma gráfica en la figura 4.11.

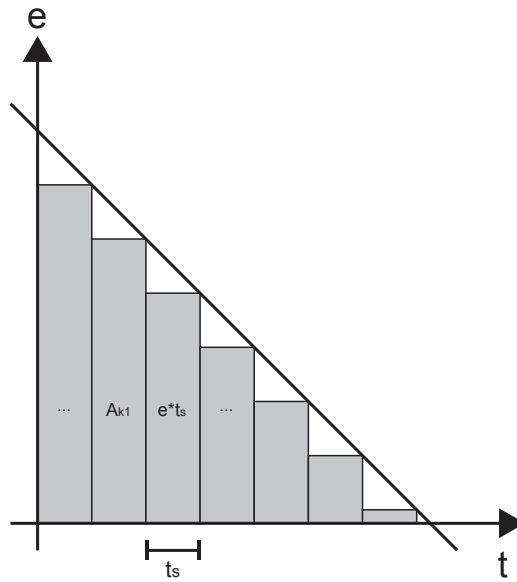


Figura 4.11: Método de Sumas de Riemann

Todo lo anterior es implementado en el microcontrolador de la siguiente manera:

$$e = t_d - t_{a1} \quad (4.2)$$

$$\int e = A_k = A_{k1} + e * t_s \quad (4.3)$$

$$A_{k1} = A_k \quad (4.4)$$

$$PWM = k_p * e + k_i * A_k \quad (4.5)$$

El resultado obtenido mediante la ecuación 4.5 es el número de ciclos durante el cual debe estar activado el calefactor según el controlador PI. Por cuestiones de hardware el detector de cruce por cero proporciona 2 dos flancos de subida por cada ciclo, por lo cual es necesario multiplicar este resultado por dos para que coincida con la cuenta de los ciclos realizada mediante la INT0. Para encontrar el número de ciclos durante el cual se desactivará el calefactor es necesario realizar una substracción entre el número total de ciclos y el resultado anterior (ecuación 4.7).

$$PWM1 = 2 * PWM \quad (4.6)$$

$$PWM2 = 100 - PWM1 \quad (4.7)$$

#### 4.4.6. Módulo de Comunicación Serial

El módulo de comunicación serial tiene como función transmitir los datos de la temperatura del horno durante el proceso de deshidratado. Este módulo únicamente es usado cuando el usuario ha seleccionado el modo de operación remoto.

El módulo de comunicación remota hace uso de la USART interna del MCU, por lo que para la comunicación se implementó un pequeño protocolo para garantizar la correcta transmisión y recepción de información. Este protocolo es muy sencillo y consiste en agregar un byte de control, el cual es enviado desde la PC con el fin de identificar el tipo de información que se recibe.

La transmisión de datos únicamente se realizará después de haber recibido el byte de control definido por parte de la PC para solicitar la transmisión de datos, por lo que la trama de transmisión únicamente está formada por los bytes de datos. A diferencia de la trama de transmisión la trama de recepción está formada por un byte de control y n bytes de datos (figura 4.12). El byte de control definirá el uso que se le dará a la información recibida, ya que según este byte los datos recibidos serán usados ya sea para configuración del proceso o para calibración.



Figura 4.12: Trama de recepción de datos

En función del byte de control será el número de datos que se reciban. Por ejemplo cuando el usuario ingresa la configuración del proceso de forma remota, el microcontrolador recibe

una trama compuesta por un byte de control y cuatro bytes de datos. Pero en el caso del monitoreo del proceso el microcontrolador espera hasta que recibe un byte control por parte de la PC, el cual confirma que ya se pueden transmitir los datos y es hasta ese momento cuando el microcontrolador transmite una trama con cuatro bytes de datos. En la figura 4.13 se muestran la forma de las tramas de comunicación de las etapas de configuración y monitoreo.

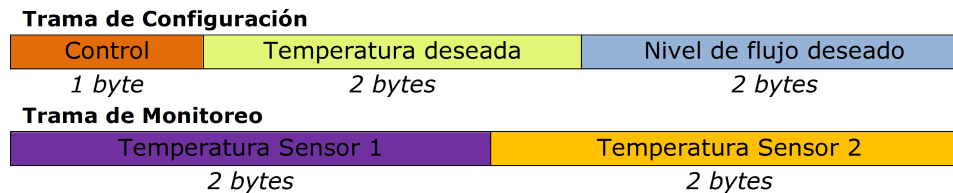


Figura 4.13: Tramas de configuración y monitoreo

En la tabla 4.5 se muestran los bytes de control y la función que representan.

Tabla 4.5: Tabla de descripción de los bytes de control

| Byte de Control | Descripción   |
|-----------------|---|
| a               | Este byte indica que la PC esta lista para recibir la temperatura actual de los sensores                        |
| c               | Este byte indica que se reciban 4 bytes para la configuración del proceso de deshidratado                       |
| t               | Este byte indica que la PC esta lista para recibir la temperatura inicial del deshidratador                     |
| z               | Este byte indica que se transmitira la calibración del flujo de aire (10 bytes)                                 |
| k               | Este byte indica que se reciban 10 bytes para la recalibración del flujo de aire                                |
| w               | Este byte indica que se reciban 8 bytes para la recalibración de las constantes del controlador de temperatura  |
| h               | Este byte indica que se reciban 2 bytes para el control de ciclos activos manual                                |
| j               | Este byte indica que se reciban 3 bytes para configurar el tamaño de la ventana de operación del controlador PI |
| x               | Este byte indica que se recibira 1 byte señalando el término del proceso de deshidratado                        |

En la figura 4.14 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento ejecutado al producirse una interrupción por la recepción de un dato. Como se puede observar este procedimiento a su vez hace uso de una función de transmisión de datos y cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 4.15.

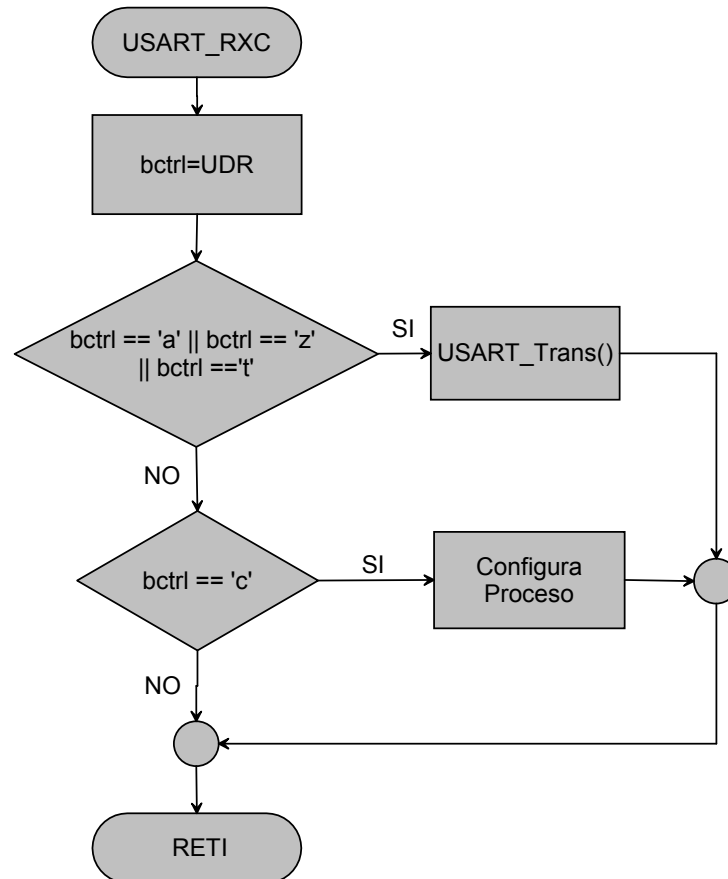


Figura 4.14: Diagrama de flujo de interrupción por recepción de datos

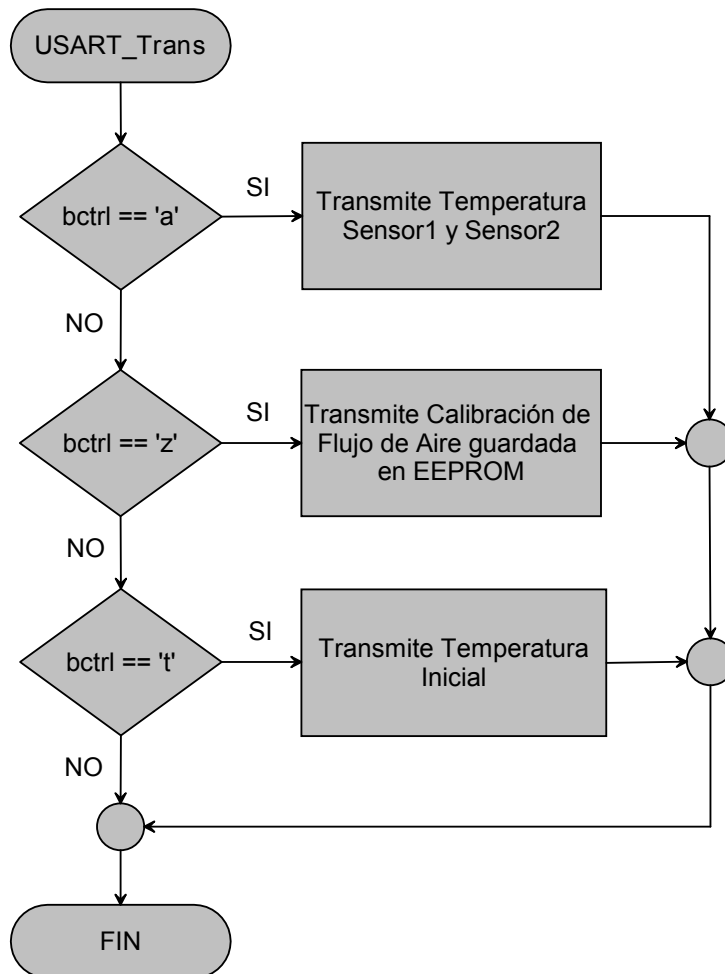


Figura 4.15: Diagrama de flujo de la función de transmisión de datos

## Capítulo 5

# Diseño de Interfaz de Usuario

El sistema ContHorno configura y monitorea el proceso de deshidratado de alimentos desde una computadora personal, lo cual le da la posibilidad de mantener historiales de forma más flexible que si fuera un sistema dedicado. Por lo que es necesario desarrollar un programa para la PC, que proporcione una interfaz de usuario que permita la interacción de éste con la computadora.

El Soft-ContHornoPC se desarrolló mediante el lenguaje de programación gráfica LabVIEW 8.2 versión estudiantil de la compañía National Instruments. La razón por la cual se decidió utilizar este software es que facilita el diseño de una interfaz de monitoreo y configuración más profesional en un menor tiempo de desarrollo, en comparación con otros ambientes de programación. La metodología usada para su desarrollo es el modelo evolutivo, el cual se describió en el capítulo anterior.

### 5.1. Especificación de Software

El Soft-ContHornoPC tiene como objetivo la configuración, sintonización y el monitoreo del proceso del deshidratador de alimentos. Los requerimientos específicos del Soft-ContHornoPC son:

- Diseño de una interfaz en donde el usuario pueda monitorear y configurar las variables del proceso de deshidratado que son controladas por el MCU.
- Implementación de comunicación serial entre el Soft-ContHornoPC para transmitir y recibir los datos de y hacia Soft-ContHornoMC.

- Crear y guardar el historial con los datos de temperatura y flujo de aire durante todo el tiempo que se ejecute el proceso.
- Selección de la configuración local o remota del proceso de deshidratado.
- Capacidad de reconfigurar las constantes del controlador de temperatura.
- Capacidad de controlar de manera manual el número de ciclos durante los cuales son activados los calefactores.
- Capacidad de variación del rango en el cual entra en funcionamiento el controlador PI.
- Ofrecer al usuario la opción de re-calibración del flujo de aire.

## 5.2. Análisis de Software

El Soft-ContHornoPC entra en uso cuando el usuario elige operar el deshidratador en modo remoto. Para su análisis el Soft-ContHornoPC está dividido en tres bloques principales que son: configuración, monitoreo y sintonización. Este software puede ser usado por dos tipos de usuarios: administrador y operador, esta división es necesaria debido a que el Soft-ContHornoPC presta las funciones de sintonización del controlador de temperatura y la calibración de flujo de aire, funciones que solo pueden ser utilizadas por personal autorizado. En la figura 5.1 se muestra el esquema descrito anteriormente.

El bloque de Configuración de Parámetros es el que se encarga de recibir los datos ingresados por el operador desde la interfaz de usuario para la configuración del proceso de deshidratado, procesarlos y transmitirlos vía puerto serial hacia el MCU.

El bloque de Monitoreo es el encargado de la recepción de los datos transmitidos desde el MCU, su procesamiento y el despliegue de los resultados en la interfaz de usuario.

El bloque de Sintonización se encarga de recibir las nuevas calibraciones ingresadas por el operador desde la interfaz de usuario, procesarlas y transmitir las al MCU mediante el puerto serial.

## 5.3. Diseño del Soft-ContHornoPC

El diseño del Soft-ContHornoPC se llevo a cabo mediante el uso de una arquitectura “divide y vencerás”, la cual consiste en la descomposición del programa en una estructura jerárquica de control, en la cual existe un programa principal que invoca a diferentes subprogramas o módulos y estos pueden llamar a otros más [20]. En la figura 5.2 se muestra el diagrama de flujo del



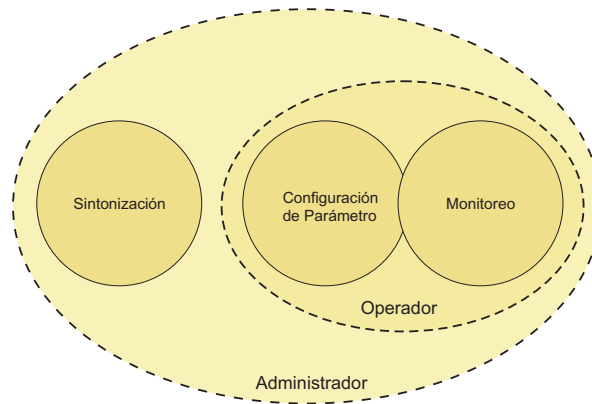


Figura 5.1: Bloques del Soft-ContHornoPC

Soft-ContHornoPC en donde se observa la forma en que está interconectados cada uno de los módulos en los que se dividió.

La interfaz de usuario del Soft-ContHornoPC se dividió en cuatro pestañas: Inicio, Configuración, Monitoreo y Sintonización. Al ejecutar el programa se dirige automáticamente a la pestaña inicio en donde se selecciona el tipo de usuario (administrador u operador), dependiendo de esto se habilita o deshabilita la pestaña de Sintonización. Posteriormente el programa accede a la pestaña de configuración en donde el usuario configura la temperatura y el flujo de aire deseado, con lo que se inicia el proceso de deshidratado y ahora el programa se dirige a la pestaña de monitoreo en donde se visualizan todos los resultados. Si el usuario ingresa como administrador, se tiene la opción de modificar constantes del controlador de temperatura, así como re-calibrar el medidor de flujo de aire. A continuación se describe de manera más detallada cada uno de los módulos que forman el Soft-ContHornoPC.

### 5.3.1. Módulos del Bloque de Configuración

#### Módulo de Usuario Tipo Operador

Cuando un usuario ingresa como Operador significa que no está autorizado para realizar cambios en las opciones presentadas en la pestaña de sintonización, por lo que este módulo se encarga de deshabilitar esta pestaña para asegurar que el usuario no provoque desajustes en el sistema ContHorno. En la figura 5.3 se muestra icono de este módulo, en donde puede observarse que únicamente tiene como entrada una referencia a las pestañas de la interfaz de usuario.

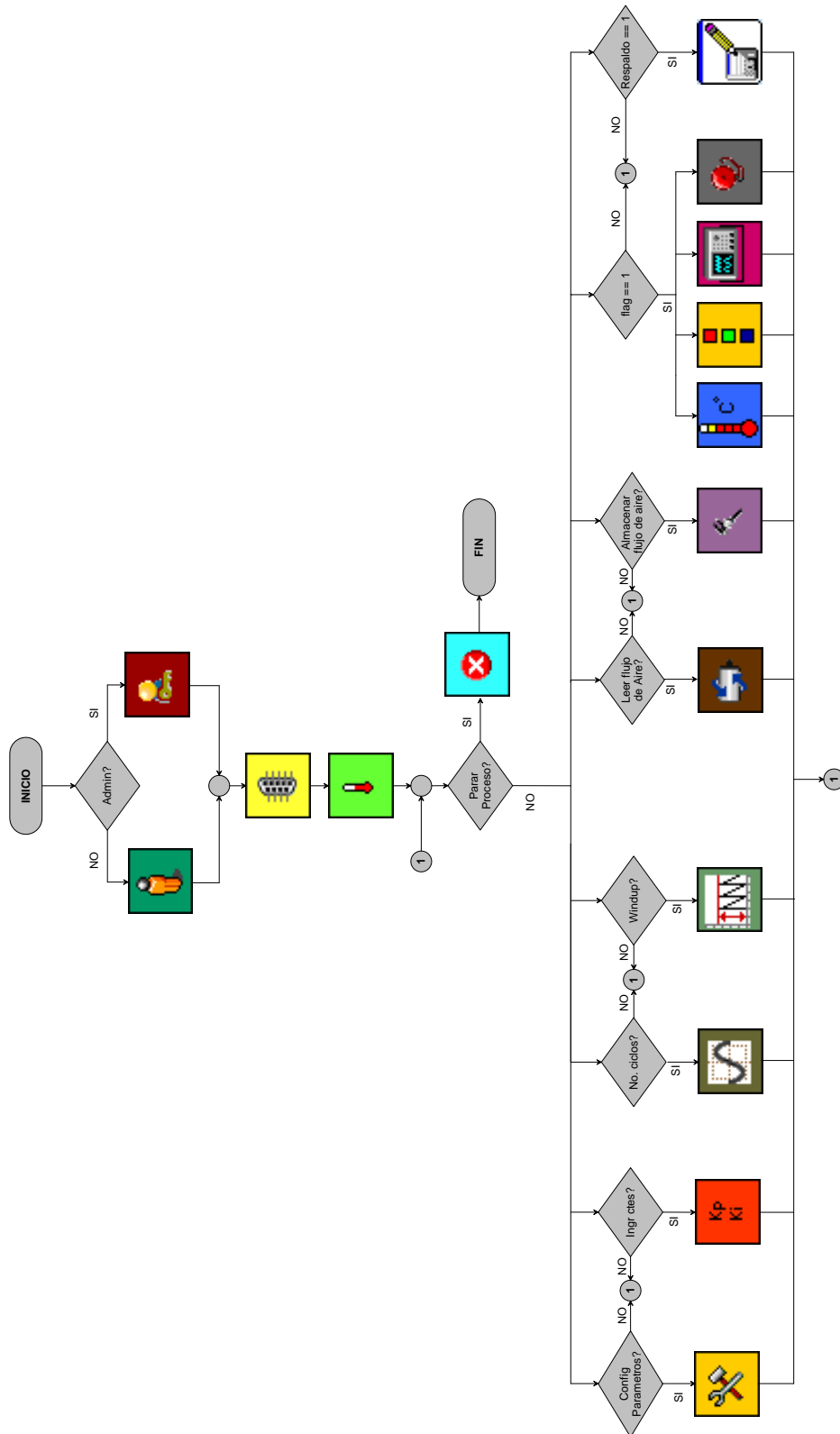


Figura 5.2: Diagrama de flujo general del Soft-ContHornoPC



Figura 5.3: Módulo de Usuario Tipo Operador

Tabla 5.1: Parámetros de configuración de una comunicación serial

| Parámetro        | Valor    |
|------------------|----------|
| Puerto           | COM1     |
| Baud Rate        | 9600     |
| Bits de Datos    | 8        |
| Paridad          | Ninguna  |
| Control de flujo | Ninguno  |
| Bits de Paro     | 1        |
| Time Out         | 10000 ms |

### Módulo de Usuario Tipo Administrador

El módulo de usuario tipo Administrador se encarga de enviar una ventana al usuario en la cual tendrá que ingresar una contraseña para asegurar que es personal autorizado para modificar las opciones presentadas en la pestaña de Sintonización, si la contraseña es válida la pestaña se habilita. En la figura 5.4 se muestra el icono de este módulo que de igual forma únicamente necesita la referencia de las pestañas.



Figura 5.4: Módulo de Usuario Tipo Administrador

### Módulo de Configuración de Puerto Serial

Este módulo tiene como función configurar los parámetros del puerto serial para mantener una comunicación sincronizada con el microcontrolador. En la tabla 5.1 se muestran los parámetros a configurar y sus valores.

En este módulo el usuario únicamente puede cambiar dos de los parámetros mostrados en la tabla 4.1, quedando definidos de forma fija los demás parámetros.

Las entradas a este módulo son:

- VISA IN: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Baud Rate: Velocidad de transmisión (9600 normalmente).

Las salidas que tiene este módulo son:

- VISA OUT: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Error: Error al abrir el puerto serial.

En la figura 5.5 se muestra el módulo de configuración de puerto serial.

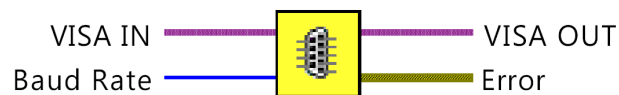


Figura 5.5: Módulo de configuración del puerto serial

### Módulo de Recepción de datos iniciales

Este módulo tiene como función recibir la temperatura inicial del proceso la cual es enviada por el MCU a través del puerto serial. Para ello le envía al MCU el byte de control (carácter 't'), y éste le envía la información de la temperatura actual del horno la cual es leída del puerto serial por esta función. El MCU envía 3 bytes, el primero corresponde a las decenas, el segundo a las unidades y el tercero al decimal. Los datos recibidos son decodificados para obtener el valor, en punto flotante, de la temperatura inicial del deshidratador.

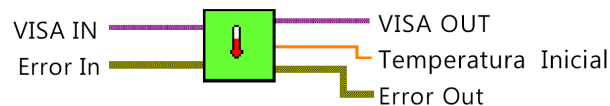


Figura 5.6: Icono del módulo de recepción de datos iniciales

Las entradas de este módulo son:

- VISA IN: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Error In: Error de Entrada.

Después de la ejecución de este módulo se tienen las siguientes salidas:

- VISA OUT: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Temperatura Inicial. Valor numérico recibido y decodificado.
- Error Out: Error de salida. Error producido al existir una falla en la recepción de datos.

### Módulo de Configuración de parámetros

El módulo de configuración de parámetros tiene las siguientes funciones:

- Recibir la temperatura deseada y flujo deseado especificados por el usuario a través de la interfaz y codificarla.
- Concatenar el byte de control (carácter 'c') con los datos codificados y transmitir la trama mediante el puerto serial hacia el MCU.

La figura 5.7 muestra el icono de este módulo, el cual tiene como entradas el nombre del puerto, el flujo de aire deseado, la temperatura deseada y el error de entrada. Después de la transmisión de datos este modulo entrega las siguientes salidas: nombre del puerto por el que se hizo la trasmisión y el error generado durante la transmisión (en caso de haberlo).

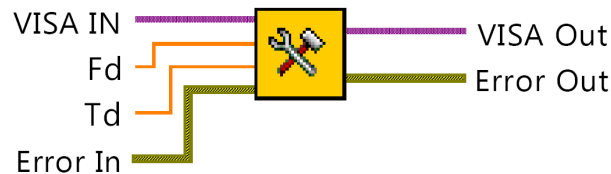


Figura 5.7: Icono del módulo de configuración de parámetros

### 5.3.2. Módulos del Bloque de Sintonización

#### Módulo de Sintonización de Constantes

El módulo de sintonización de constantes es el encargado de modificar las constantes  $k_p$  y  $k_i$  del controlador PI que se encarga de regular la temperatura y las cuales están almacenadas en el MCU. Las acciones que realiza este módulo son:

- Recibir las constantes ingresadas por el usuario desde la interfaz y codificarlas.
- Concatenar el byte de control (carácter 'w') con los datos codificados y transmitirlos mediante el puerto serial hacia el MCU.

Este módulo tiene como entradas el nombre del puerto, el error de entrada y dos valores numéricos que son las constantes  $k_p$  y  $k_i$ . Sus salidas son el nombre del puerto y el error durante la transmisión. En la figura 5.8 se muestra el icono de este módulo con sus entradas y salidas.

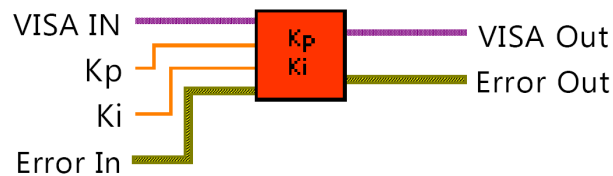


Figura 5.8: Icono del módulo de sintonización de constantes

### Módulo de Control de Temperatura Manual

Este módulo tiene como función realizar un control de temperatura manual, es decir el usuario indicará desde la interfaz durante cuantos ciclos de CA quiere que el calefactor este encendido. Esta es una más de las prestaciones de este software con el fin de poder hacer estudios para posteriores sintonizaciones. Las acciones que realiza este módulo son las siguientes:

- Recibir el número de ciclos activos ingresados por el usuario desde la interfaz y codificarlos.
- Concatenar el byte de control (carácter 'h') con los datos codificados y transmitirlos mediante el puerto serial hacia el MCU.

El calefactor trabaja con un periodo de 50 ciclos, así que el usuario puede ingresar como constante máxima 50 ciclos, esto significa que el calefactor estará activo durante todo el tiempo. Si el usuario ingresa 25 ciclos esto indica que el calefactor se activara durante 25 ciclos y se desactivara durante los restantes 25 ciclos. En la figura 5.9 se muestra el icono de este módulo en donde se muestra que tiene como entradas el nombre del puerto serial, el número de ciclos activos y el error de entrada. Sus salidas son el nombre del puerto por el que se hizo la transmisión y el error producido durante la transmisión.

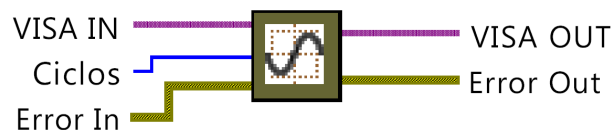


Figura 5.9: Icono del módulo de control de temperatura manual

### Módulo de Rango de Controlador PI

El control de temperatura empleado en el sistema ContHorno aplica dos técnicas de control: ON/OFF y PI. El controlador PI entra en funcionamiento cuando el deshidratador alcanza cierta temperatura (temperatura deseada  $\pm 1$  por default). El módulo de Rango de Control PI tiene la función de modificar el tamaño del rango durante el cual va a entrar en funcionamiento este controlador. Las acciones que realiza este módulo son:

- Recibir el tamaño de la ventana en la cual entrara en funcionamiento el controlador PI y codificar este dato.
- Concatenar el byte de control (carácter 'j') con los datos codificados y transmitirlos mediante el puerto serial hacia el MCU.

Las entradas de este módulo son:

- VISA IN: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Rango: Valor numérico del tamaño del rango. Es decir para el caso por default el usuario tiene que ingresar 2.
- Error In: Error de entrada producido por los módulos anteriores.

Después de realizar la codificación y transmisión del rango hacia el MCU mediante el puerto serial, las salidas que provee este módulo son:

- VISA OUT: Nombre del puerto serial (COM1, COM2, etc.).
- Error Out: Error de salida. Error producido al existir una falla en la transmisión de datos.

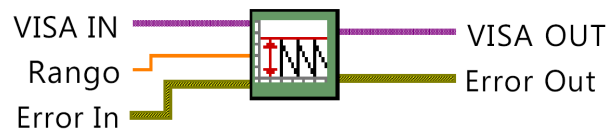


Figura 5.10: Icono del módulo de rango de controlador PI

### Módulo de Calibración de Flujo de Aire Actual

La calibración del flujo de aire en el sistema ContHorno esta almacenada en la EEPROM del MCU, la función de este módulo es enviar un byte de control (carácter 'z') con el que se ordena al microcontrolador leer la calibración almacenada y enviarla hacia la PC. Este mismo módulo realiza la recepción de datos y su decodificación para poder visualizarla en una tabla. Las entradas de este módulo son: el nombre del puerto por el que se hará la comunicación y el error de entrada. Los datos recibidos son una tabla de caracteres con la información de la calibración y el error en la recepción de datos. En la figura 5.11 se muestra el icono de este módulo.

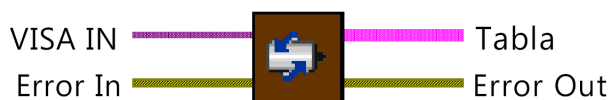


Figura 5.11: Icono del módulo de calibración de flujo de aire actual

Tabla 5.2: Tabla de calibración de flujo de aire

| Nivel | No. de Ciclos | Flujo de Aire [m/s] |
|-------|---------------|---------------------|
| 1     | 0             | 0                   |
| 2     | 6             | 0.6                 |
| 3     | 8             | 1.0                 |
| 4     | 14            | 1.2                 |
| 5     | 20            | 1.3                 |

### Módulo de Re-Calibración de Flujo de Aire

El módulo de re-calibración de flujo de aire es una de las prestaciones más importantes que aporta el Soft-ContHornoPC, ya que por medio de este módulo se puede modificar la calibración del flujo de aire almacenada en la EEPROM del MCU. Esta prestación es muy importante porque se pueden hacer re-calibraciones periódicamente desde la PC sin necesidad de programar nuevamente el MCU.

Para hacer uso de esta opción el usuario únicamente tiene que rellenar la tabla de re-calibración presente en la pestaña de sintonización. En la tabla 5.2 se muestra la calibración por default para mostrar el formato del contenido de esta tabla.

Las acciones que realiza este módulo son:

- Codificación de la tabla de re-calibración ingresada por el usuario.
- Concatenación del byte de control (carácter 'k') y los datos codificados.
- Transmisión de la trama de datos por medio del puerto serial hacia el MCU.

En la figura 5.12 se muestra el icono del módulo de re-calibración de flujo de Aire. Las entradas de este módulo son: el nombre del puerto serial, la tabla de re-calibración y el error de entrada. Sus salidas, de igual forma que muchos de los módulos anteriores son: el nombre del puerto serial y el error producido en la transmisión. Estas salidas únicamente son utilizadas para llevar una secuencia entre la ejecución de los módulos, ya que así se garantiza que el módulo siguiente se ejecute hasta que termine la ejecución del módulo actual.



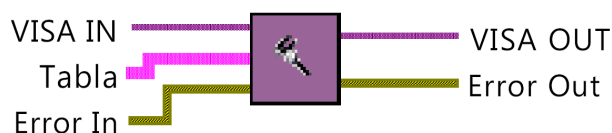


Figura 5.12: Icono del módulo de re-calibración de flujo de aire

### 5.3.3. Módulos del Bloque de Monitoreo

#### Módulo de Recepción de Temperatura Actual

El módulo de recepción de temperatura actual tiene la función de recibir la temperatura actual a la que se encuentran los sensores dentro del deshidratador. Las acciones que realiza este módulo son:

- Transmitir un byte de control (carácter 'a') para indicar al MCU que la PC esta lista para recibir la temperatura actual de los sensores.
- El MCU transmite estos datos por el puerto serial y este módulo hace la recepción de los datos y los decodifica.

En la figura 5.13 se muestra el icono de este módulo, en donde se observa que las entradas son: el nombre del puerto serial y el Error de entrada. Las salidas son dos valores numéricos que representan la temperatura actual en el sensor 1 y 2.

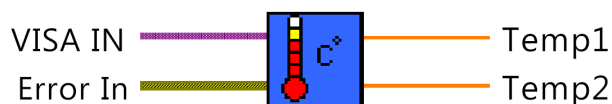


Figura 5.13: Icono del módulo de recepción de temperatura actual

#### Módulo de Estado del Proceso

El módulo de estado del proceso se encarga de visualizar, por medio de indicadores visuales, el estado en el que se encuentra la temperatura del deshidratador. Los estados son temperatura baja, temperatura estable y temperatura alta. Además calcula el gradiente de temperatura entre el sensor 1 y 2. En la figura 5.14 se muestra el icono de este módulo que tiene como entradas 3 valores numéricos la temperatura deseada, la temperatura del sensor 1 y la temperatura del sensor 2. Sus salidas son un valor numérico, el gradiente de temperatura y tres valores lógicos: baja, estable y alta.

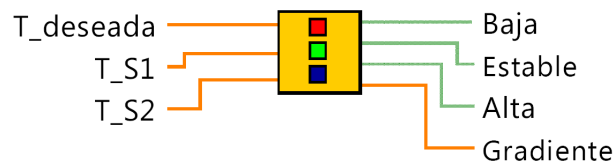


Figura 5.14: Icono del módulo de estado de proceso

### Módulo de Graficación

El módulo de graficación tiene como función graficar la temperatura del sensor 1 y del sensor 2. Las entradas a este módulo son los arreglos que contienen la temperatura del sensor 1 y 2. La salida es un arreglo de caracteres que pueden ser graficados en un “waveform graph”. En la figura 5.15 se muestra el icono del módulo de graficación.

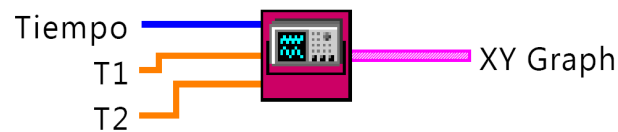


Figura 5.15: Icono del módulo de graficación

### Módulo de Alerta

El módulo de alerta se encarga de emitir una alerta visual y auditiva cada que transcurre el tiempo configurado por el usuario. Este módulo tiene como entrada el periodo de tiempo en el cual se va a emitir la alerta, y un botón de Reset para reiniciar el tiempo y sus salidas son el tiempo transcurrido y un valor lógico que indica el momento cuando se termina el periodo configurado. En la figura 5.16 se muestra el icono del módulo de alerta.

El módulo de alerta es de gran utilidad para el usuario ya que cada cierto tiempo necesita realizar mediciones de los alimentos que están siendo deshidratados y con este módulo se lleva a cabo el recordatorio visual y auditivo al usuario para que realice las mediciones.



Figura 5.16: Icono del módulo de alerta

### Módulo Guardar Historial

El módulo guardar historial se encarga de guardar los datos de la grafica obtenida en el módulo de graficación en la ruta definida por el usuario. Este módulo entrara en funcionamiento

cada que se cumpla el tiempo definido por el usuario para el respaldo de datos. En la figura 4.17 se muestra el icono del módulo guardar historial con sus entradas y salidas.

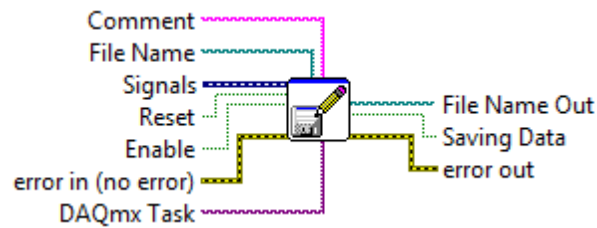


Figura 5.17: Icono del módulo guardar historial

### Módulo Terminar Proceso

El módulo terminar proceso se encarga de parar el proceso de deshidratado. Las acciones que realiza este módulo son:

- Transmitir al MCU un byte de control (carácter 'x') para indicarle el paro del proceso y así que éste haga un reset.
- Cerrar el puerto serial con lo que se finaliza la comunicación entre la PC y el MCU.

Este módulo tiene como entradas el nombre del puerto serial y el error de entrada y su salida es el error producido al cerrar el puerto. En la figura 4.18 se muestra el icono del módulo terminar proceso.

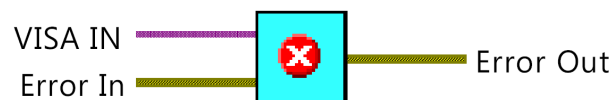


Figura 5.18: Icono del módulo terminar proceso

## 5.4. Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario está compuesta por un panel de control con cuatro secciones: Inicio, Configuración, Monitoreo y Sintonización.

La sección Inicio es donde se selecciona el tipo de usuario que hará uso del software. Existen dos tipos de usuario administrador y operador, la diferencia entre ellos es que el modo administrador nos permite realizar cambios en el controlador de temperatura y la calibración de flujo de aire. En la figura 5.19 se muestra el contenido de esta sección.



Figura 5.19: Sección Inicio

La sección de configuración del Soft-ContHorno, es en donde el usuario tiene que configurar los parámetros del proceso, se divide en cuatro bloques que son:

- Configuración de parámetros. Es donde se indica la temperatura inicial del horno y además se ingresa la temperatura y flujo de aire deseados.
- Duración del intervalo. Se define el tiempo de alerta en minutos, esto con el fin de que el operador realice las mediciones correspondientes de las muestras que esta deshidratando, cada cierto tiempo mediante una alarma audible.
- El bloque guardar historial de mediciones. En esta parte el operador elige la ruta y nombre del archivo donde se guardaran todas las mediciones, así como la frecuencia con la que se respaldaran las mediciones.
- Configuración de puerto serie. Se configura la comunicación serial entre el MCU y la PC, estos parámetros son el nombre del puerto serial por donde está conectado el horno y la velocidad de comunicación (baud rate). Estos valores serán siempre los mismos, ya que si se modifican también es necesario cambiar la configuración de la comunicación en el MCU para poder establecer una comunicación correcta.

En la figura 5.20 se muestra la sección de Configuración y sus componentes. Donde se visualiza que la temperatura inicial del proceso es 22.5 °C, la temperatura deseada es 60 °C, el nivel de flujo de aire deseado es 4 (1.2 m/s), se emitirá un sonido de alarma cada 15 minutos, la información se respaldara cada 60 minutos en el archivo mediciones.lvm y la comunicación se realiza por el puerto serial COM1 con un baud rate de 9600 bps.



Figura 5.20: Sección de Configuración

Después de realizar la configuración del proceso, el Soft-ContHorno entra en la etapa de monitoreo del proceso (figura 5.21). Esta etapa está dividida en cinco secciones que son:

- La temperatura actual. Se muestra la temperatura leída por los 2 sensores de temperatura con que cuenta el horno. Además se despliega el gradiente de temperatura entre los dos sensores.
- Flujo de aire actual. Muestra el nivel de flujo con el que se está realizando el proceso de deshidratado.
- La sección alerta eventual. Muestra información acerca del tiempo del proceso, cada cuanto tiempo se va emitir una alerta visual y sonora, cuánto tiempo a transcurrido y el número de intervalos que han transcurrido.

- Gráfica de temperatura. Tiene la función de presentar la temperatura de ambos sensores a lo largo de todo el proceso de deshidratado, estos datos serán respaldados en un archivo cada que se cumpla el intervalo de tiempo configurado.
- Estado del proceso. Está formado por tres indicadores que muestran si la temperatura es baja, alta o se encuentra dentro del intervalo establecido como estable.

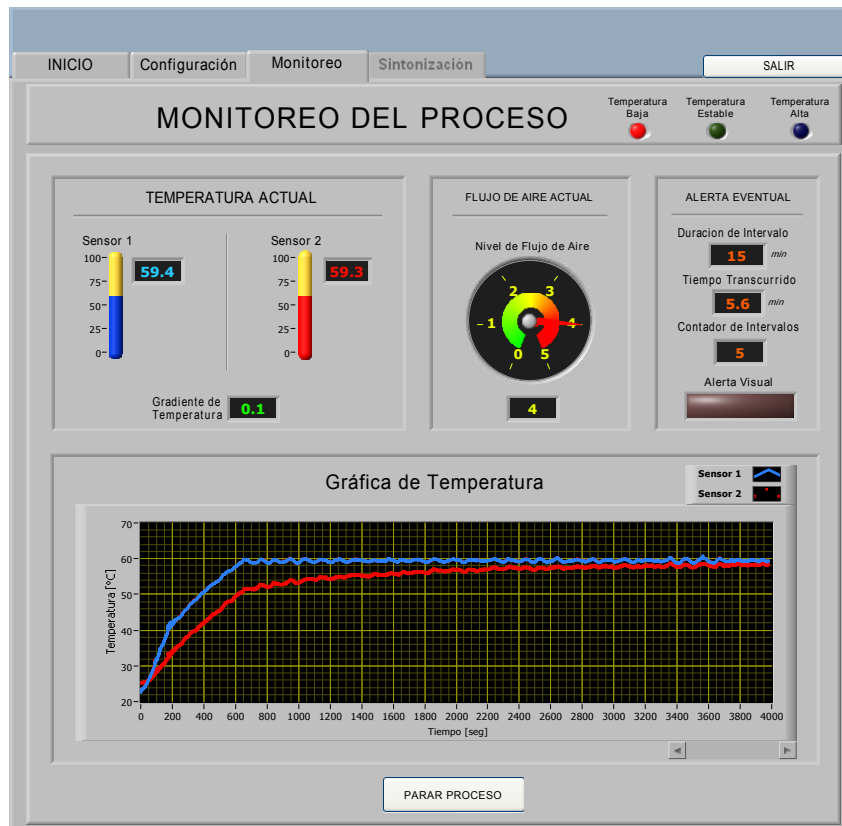


Figura 5.21: Sección de Monitoreo

La sección de sintonización es una de las prestaciones más importantes de este sistema ya que en esta sección pueden realizarse ajustes en diversos parámetros del control de temperatura y en la calibración de flujo de aire, acciones que permite reconfigurar parámetros almacenados en el MCU sin necesidad de reprogramarlo, lo que permite que puedan hacerse cambios en el futuro más fácilmente.

Esta sección está dividida en cuatro bloques (figura 5.22).

- El bloque de sintonización del controlador PI, que nos permite modificar las constantes  $k_p$  y  $k_i$  del controlador de temperatura.

- El bloque de control de número de ciclos permite controlar de manera manual el número de ciclos de CA durante los cuales estarán habilitados los calefactores. Esto para realizar experimentos futuros.
- El bloque configurar ventana PI permite configurar el intervalo de temperatura en el cual va a entrar en funcionamiento el controlador PI.
- El bloque de calibración de flujo de aire tiene dos funciones: la primera permite leer los datos de calibración de flujo de aire almacenados en la EEPROM del MCU y la segunda modifica la calibración, es decir cargar nuevos datos en la EEPROM del MCU. Este bloque es muy importante ya que si en el futuro se cambia la fuente de flujo de aire será relativamente fácil hacer los cambios en el sistema.



Figura 5.22: Sección de Sintonización





## Capítulo 6

# Pruebas y Resultados

En los capítulos anteriores se describió la forma en que se realizó el control del horno para el deshidratado de alimentos. En este capítulo se van a describir las pruebas realizadas al sistema ContHorno, las cuales se dividen en pruebas hardware, software y calibración.

Las pruebas hardware consisten en monitorear las señales más importantes provenientes del hardware y verificar su comportamiento con respecto al que se esperaba. Éstas se realizaron con un multímetro y un osciloscopio.

Las pruebas de software básicamente se centran en el funcionamiento de la interfaz de usuario desarrollada bajo el ambiente de programación gráfica LabVIEW. El Soft-ContHornoPC es parte importante de estas pruebas ya que gracias a su función de monitoreo se puede verificar que la temperatura se controla de forma correcta.

Las pruebas a realizar son de caja negra y blanca. Las pruebas de caja negra son aquellas que ven al sistema como un todo, en el cual existen entradas y salidas. Las pruebas de caja negra se le realizaron al programa Soft-ContHornoPC, con el cual se pudo conocer el comportamiento del sistema en general. Las pruebas de caja blanca se le realizaron al hardware con el fin de conocer el comportamiento de las etapas más importantes del sistema [20].

La medición del flujo de aire se hace en forma indirecta en función de la potencia eléctrica que se le aplica. Por tal motivo es necesario calibrar la relación entre potencia y el flujo que se obtiene, con el fin de tener el menor error. En la pruebas de calibración se muestran la forma en que se llevo a cabo la calibración del flujo de aire.

## 6.1. Pruebas de Hardware

Las pruebas de hardware, o de caja blanca, permiten conocer el funcionamiento de cada una de las etapas que conforman el sistema ContHorno. Como se vio en el Capítulo 2, el sistema ContHorno se divide en cinco etapas, pero dos son las principales y las que nos interesa saber su funcionamiento: el módulo de acondicionamiento de señal y el módulo de procesamiento.

Las pruebas de hardware se llevaron a cabo con la ayuda del Multímetro Tektronix y Osciloscopio Tektronix TDS220 y puntas atenuadoras para llevar a cabo las mediciones de CA. El TDS220 tiene la capacidad de ser monitoreado desde una computadora personal, por lo que se usó software de control que suministra el fabricante del equipo para obtener las imágenes presentadas.

### 6.1.1. Prueba de detector de cruce por cero

El detector de cruce por cero es una de las etapas más importantes y de cuyo funcionamiento depende el control de temperatura y flujo de aire. Esta etapa tiene como entrada la señal de CA que proporciona CFE y como salida una señal cuadrada que está en función a la señal de entrada.

En la figura 6.1 se observa una señal senoidal de 125 Vrms y 60 Hz que es la señal de entrada de esta etapa, como salida se observa una señal que está en función a la señal de entrada, ya que cada que esta cruza por 0 V se tiene un cambio en la señal de salida de la etapa; cuyo flanco de subida tiene una amplitud de 5.44 V y una frecuencia de 120 Hz. Esta señal de salida entra a la interrupción del microcontrolador para llevar el conteo de ciclos de CA para realizar el control de temperatura y flujo de aire.

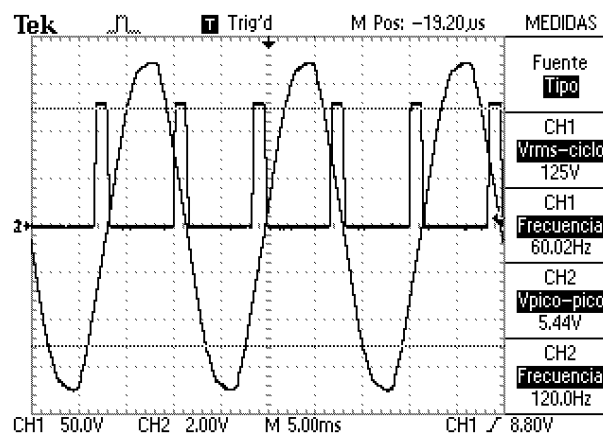


Figura 6.1: Comportamiento del detector de cruce por cero

### 6.1.2. Prueba de módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento está basado en un MCU, el cual realiza todas las funciones de control e interfaz con los diferentes periféricos.

Las funciones de control son muy importantes porque de esto depende el correcto funcionamiento del proceso en general, ya que estas salidas controlan a los actuadores (calefactores y ventilador).

Para llevar a cabo el control del proceso, el MCU recibe como entrada la señal proveniente del detector de cruce por cero, el MCU lleva la cuenta de los niveles altos presentados en esta señal con los cuales realiza los cálculos de control y cuyos resultados se ven reflejados en una señal de salida que indica el tiempo (en función del número de ciclos de CA) que los actuadores estarán habilitados.

Las señales de control para el ventilador y los calefactores son señales cuadradas cuyo ciclo de trabajo depende de la calibración en el caso del ventilador y de la respuesta del controlador PI en el caso de los calefactores.

La señal de control del ventilador tiene una frecuencia de 3 Hz, ya que tiene un periodo máximo de 20 ciclos de CA. La señal de control para los calefactores tiene una frecuencia 1.2 Hz, ya que su periodo máximo es de 50 ciclos de CA.

Estas señales controlan la activación y desactivación de los actuadores, debido a la configuración del hardware de la etapa de potencia estas señales deben tener un valor de 0V para activar al actuador y un valor de 5V para desactivarlo. En las figuras presentadas en la siguiente sección se muestran estas señales.

### 6.1.3. Pruebas de etapa de potencia

La etapa de potencia es importante debido a que las señales con nivel TTL provenientes del MCU no son óptimas para disparar un Triac, además de que es necesario aislar la etapa de control con la etapa de potencia para evitar sobrecorrientes que puedan dañar la etapa de control.

Las entradas de esta etapa son las señales de control provenientes del MCU, las cuales a través de los optoacopladores controlan el disparo de los Triacs. Como salida se tiene una señal de CA que dependiendo de la señal de control se activa o desactiva por determinado número de ciclos enteros de CA.

## Control de Potencia del Ventilador

El control de flujo de aire del sistema ContHorno es una de las etapas que sufrió más modificaciones durante el desarrollo de este trabajo, ya que antes de llegar al diseño final se implementó de 2 formas distintas, las cuales no dieron buenos resultados.

La primera de ellas consistía en obtener una relación entre la corriente que consumía el ventilador y el flujo de aire que producía; la corriente era medida mediante un transformador de corriente tipo dona pero está era muy pequeña y fue complicado procesarla debido al ruido electromagnético. La segunda fue variando la potencia mediante un control por ángulo de fase, pero los resultados obtenidos al medir el flujo de aire eran demasiado inestables.

Finalmente, se decidió probar un control de potencia por ciclos enteros, en donde, el flujo de aire producido por el ventilador está en función del número de ciclos de CA con los que se alimenta este actuador, con lo cual se obtuvieron mejores resultados.

Para el control de flujo de aire se definió un periodo de 20 ciclos por lo que la señal de control varía su ciclo de trabajo de acuerdo al nivel de flujo de aire seleccionado por el usuario. En la figura 6.1.3.a se muestra la señal de control y la señal que activa al ventilador cuando se elige el máximo flujo de aire (1.3 m/s). En la figura 6.1.3.b se muestran las señales de control y potencia para un flujo de aire de 1.2 m/s. Como se observa, cuando la señal de control tiene un valor de 0V la etapa de potencia deja pasar completamente la señal de CA que alimenta al ventilador por lo que se mantiene encendido y cuando la señal de control tiene un valor de 5V la señal de CA deja de alimentar al ventilador por lo que se mantiene apagado. La figura 6.1.3.c y 6.1.3.d muestran las señales para un flujo de aire de 1 m/s y 0 m/s respectivamente.

Si se hace una comparación con la tabla 4.3, podemos observar que los resultados coinciden ya que según la tabla para obtener un flujo de aire de 1.2 m/s se debe activar el ventilador durante 14 ciclos y apagarlo durante 6 ciclos y así sucesivamente, lo cual se corrobora en la figura 6.1.3.b. Para obtener un flujo de aire de 1 m/s el número de ciclos activos es 8 como se observa en la figura 6.1.3.c.

El periodo del controlador es de 20 ciclos por lo que la señal se repite cada 333 ms aproximadamente, en consecuencia el tiempo en que el ventilador se encuentra encendido o apagado es demasiado pequeño esto ayuda a que el flujo proporcionado por el ventilador sea continuo y no se perciban intermitencias.

Al realizar estas pruebas también pudimos constatar que en algunas ocasiones existe un error de medio ciclo esto debido a todos los tiempos muertos en el MCU que se van acumulando, pero este error no afecta en ningún aspecto al funcionamiento del sistema ContHorno.

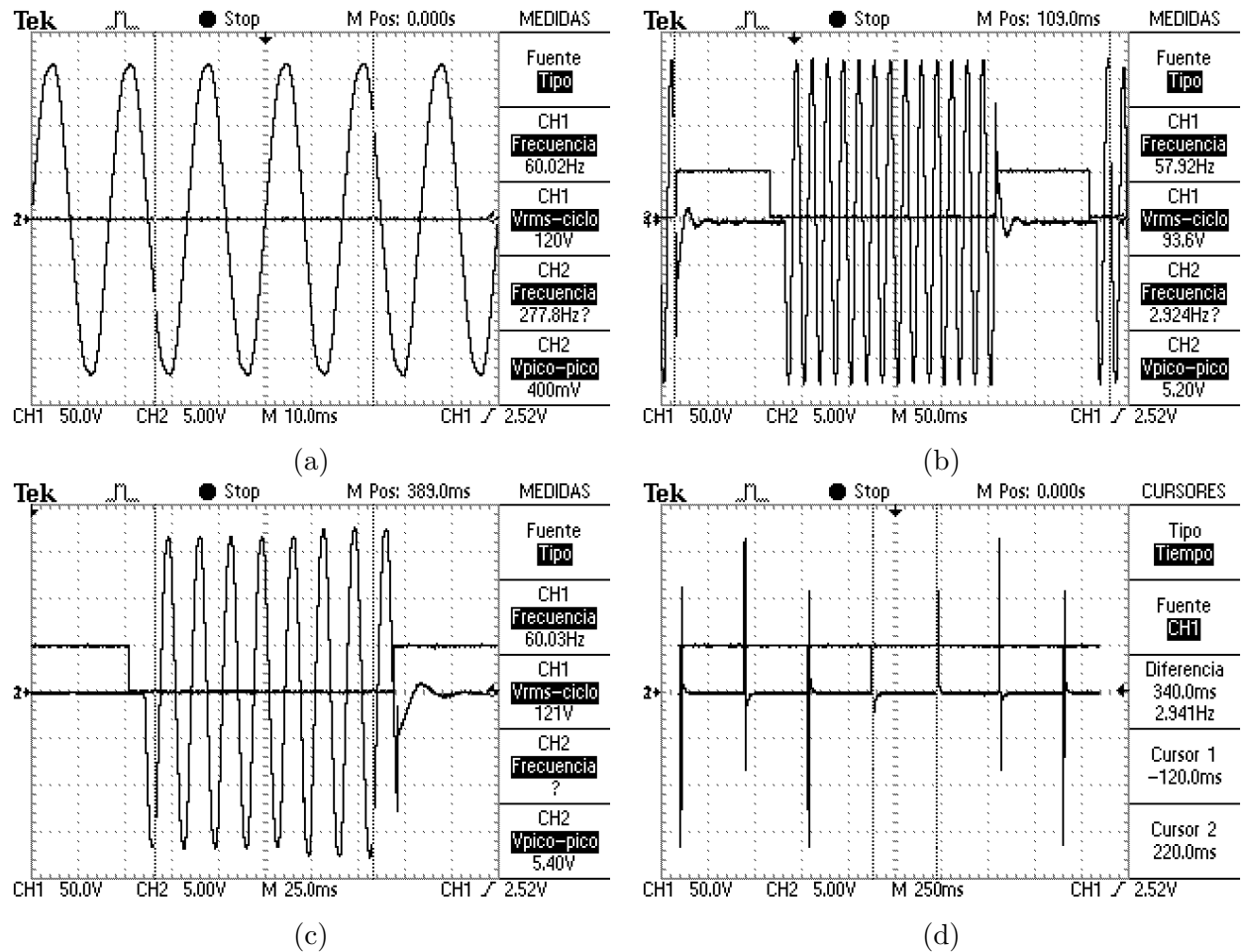


Figura 6.2: (a). Señal de control y salida para un flujo de aire máximo (1.3 m/s). (b). Señal de control y salida para un flujo de aire de 1.2 m/s. (c). Señal de control y salida para un flujo de aire de 1.0 m/s. (d). Señal de control y salida para un flujo de aire de 0 m/s.

### Control de Potencia de Calefactores

El control de los calefactores se realiza mediante un controlador PI el cual entra en funcionamiento cuando la temperatura del horno esta un grado por debajo de la temperatura deseada. La respuesta del controlador PI está en función del número de ciclos de CA que alimentan a los calefactores y que logran incrementar o mantener la temperatura. El periodo del controlador es de 50 ciclos, lo que quiere decir que la respuesta de éste varía de 0 a 50 ciclos para lograr regular la temperatura.

En la figura 6.1.3.a se muestra el comportamiento del controlador PI, al principio la señal de CA que alimenta a los calefactores está presente y a medida que la temperatura del horno llega a la temperatura deseada el número de ciclos durante los cuales se encienden los calefactores

disminuyen hasta que se apagan por completo. En la figura 6.1.3.b se observan la señal de control y la señal que activa al calefactor en un lapso del control. En la figura 6.1.3.c y 6.1.3.d se muestra de manera más clara como la señal de salida responde a la señal de control, cuando la señal de control esta en bajo (0V) la señal de CA alimenta a los calefactores y los calefactores permanecen apagados cuando la señal de control esta en alto (5V).

En algunas ocasiones se tiene un error de medio ciclo, lo cual no afecta la respuesta del sistema, esto puede ser debido a que por los tiempos muertos en el MCU no existe una sincronización precisa entre los ciclos de CA y la señal de activacion proporcionada por el optoacoplador, ademas de la existencia de ruido EMI.

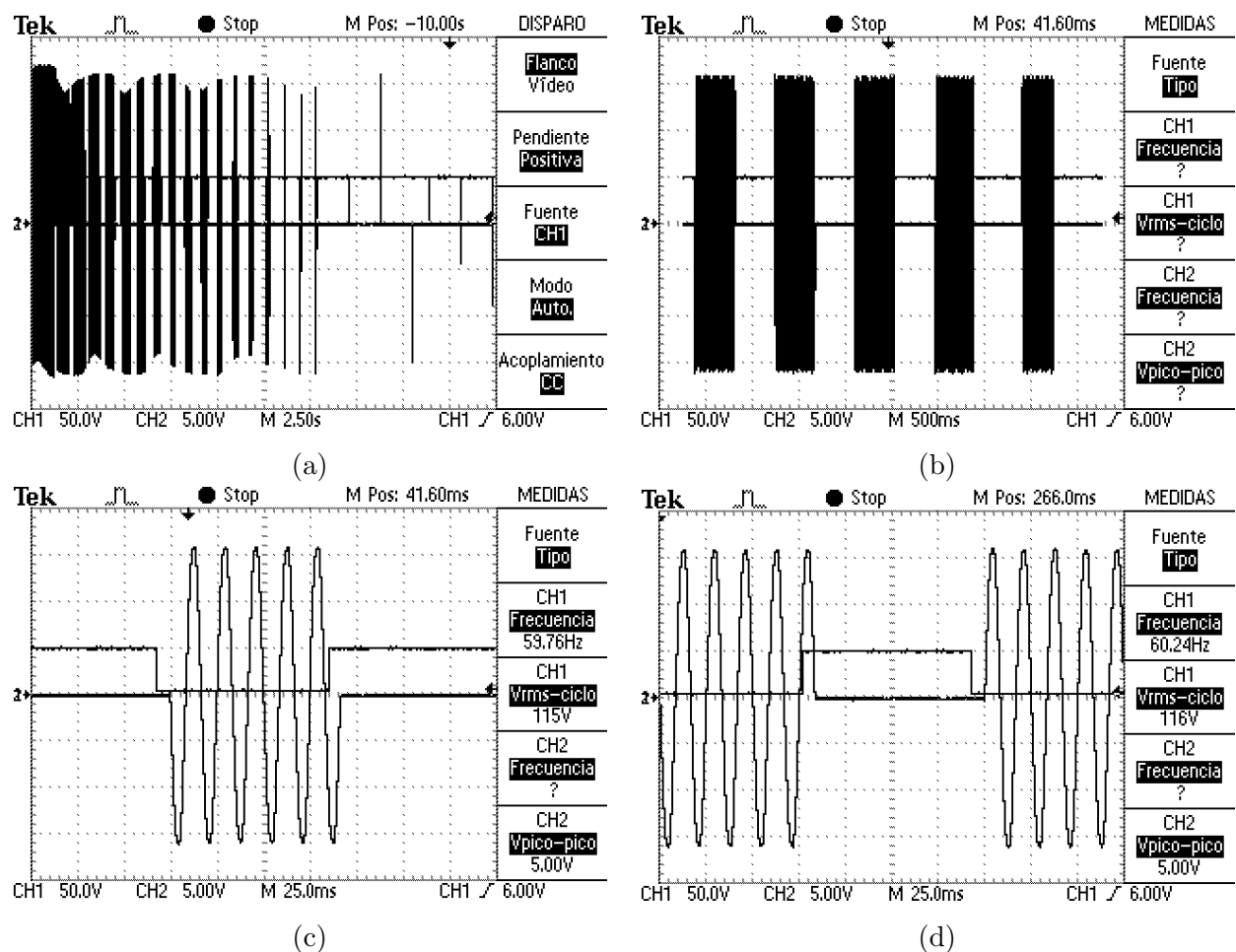


Figura 6.3: (a). Ciclos de CA en los calefactores al llegar a la temperatura deseada. (b). Activación de los calefactores para regular la temperatura. (c). Señal de Control y Señal de Salida en los calefactores. (d). Señal de Control y Señal de Salida en los calefactores.

## 6.2. Pruebas de Sintonización del Sistema

El sistema ContHorno fue sintonizado de forma experimental. Este sistema lleva a cabo el control de temperatura mediante un control por ciclos enteros, lo primero que se necesita es elegir el número de ciclos del control.

Debido a que la respuesta de un horno es bastante lenta, no es necesario tener un periodo de muestreo muy pequeño; pero tampoco debe ser muy grande para evitar que el sistema se vuelva inestable. En este caso, la elección del periodo de muestreo se llevó a cabo tomando en cuenta las características del hardware y el comportamiento del sistema. Por lo cual se definió un periodo de 50 ciclos de CA, lo que equivale a un periodo de muestreo de  $T=16.6 \text{ ms} \cdot 50 \text{ ciclos}=833.3 \text{ ms}$ , que es un tiempo aceptable para que el horno responda de forma adecuada ante los diferentes cambios que se puedan presentar en el sistema.

Con lo anterior, se sabe que el controlador PI es recalculado cada 833.3 ms. Ahora es necesario conocer los valores de las constantes del controlador para llevar a cabo el cálculo del número de ciclos durante el cual debe estar activado el calefactor, que fue descrito en el capítulo 3.

Las constantes  $k_p$  y  $k_i$  se obtuvieron experimentalmente, las primeras pruebas se realizaron con la ayuda de un foco en cuya bombilla se montó el sensor de temperatura LM35, con el fin de encontrar las constantes adecuadas para regular la temperatura en el foco y así después realizar pruebas directamente en el horno.

La sintonización comenzó asignando los siguientes valores a las constantes  $k_p = 0,1$  y  $k_i = 0,001$ , se procedió a grabar los cambios en el MCU y se monitoreo el comportamiento de la temperatura mediante el LCD. Se observó que la temperatura se incrementaba muy lentamente, por lo que se procedió a aumentar el valor de la constante proporcional ( $k_p$ ) para lograr que la temperatura creciera más rápido.

El siguiente problema que se presentó es que la temperatura al llegar al valor deseado seguía incrementándose, tardando mucho tiempo en regresar a la temperatura deseada, es decir existía un sobretiro muy grande en la respuesta del sistema. Las constantes fueron incrementadas y decrementadas pero no se pudo obtener una solución.

Después de analizar este comportamiento, se llegó a la conclusión de que dicho problema se presentaba debido a que el sistema era muy lento, lo que provocaba que la parte proporcional del controlador se incrementara demasiado; en consecuencia, al llegar a la temperatura deseada este valor tardaba mucho tiempo en disminuir, ocasionando que la temperatura siguiera aumentando.

Para solucionar esto, se utilizaron dos técnicas de control ON-OFF y PI. Así cuando el error es mayor a 1, se utiliza el control ON-OFF y cuando el error es menor a  $1^\circ\text{C}$  entra en funcionamiento el control PI. Debido a que el control PI solo entra en funcionamiento cuando

existe un error de  $1^{\circ}\text{C}$  en la temperatura, la parte proporcional no se incrementa demasiado por lo que la respuesta del sistema no presenta sobretiro.

Después de esto se procedió a probar el sistema directamente en el horno y se comenzó a ajustar la constante  $k_p$  aumentándola para lograr que la temperatura creciera más rápido. Con ello se llegó a un valor de  $k_p = 50$ , al sobrepasar este valor se comenzó a tener demasiado sobretiro en la temperatura.

De igual forma, la constante integral ( $k_i$ ) se fue variando, se probó con valores superiores a 0.001 con lo cual se obtuvieron respuestas incorrectas ya que la temperatura se regulaba en una temperatura superior a la deseada, por lo que ahora se decremento el valor de  $k_i$  por debajo de 0.001 hasta llegar a tener una respuesta satisfactoria con un valor de  $k_i = 0,00005$ . De acuerdo a lo antes descrito las constantes que experimentalmente dieron el mejor resultado fueron  $k_p = 50[\text{ciclos}/^{\circ}\text{C}]$  y  $k_i = 0,00005[\text{ciclos}/^{\circ}\text{C}]$ .

### 6.3. Pruebas de Software

Las pruebas software o de caja negra ayudan a probar el funcionamiento del sistema Cont-Horno como un todo, gracias a que el Soft-ContHornoPC lleva a cabo el monitoreo del proceso de deshidratado y éste es el objetivo principal de este sistema. Para realizar esta prueba se configuro el sistema mediante el Soft-ContHornoPC con los siguientes parámetros (ver figura 6.4):

- Temperatura deseada:  $60^{\circ}\text{C}$ .
- Nivel de Flujo de Aire: 4.
- Tiempo de Alerta: 15 minutos.
- Respaldo de información cada: 10 minutos.

Después de la configuración el sistema inicia el incremento de la temperatura hasta llegar a la temperatura deseada en este caso  $60^{\circ}\text{C}$ . La temperatura en la que inicio el proceso fue  $22.5^{\circ}\text{C}$ . El comportamiento de la temperatura percibida por los dos sensores del sistema a lo largo del tiempo se visualiza en la sección de monitoreo.

En la figura 6.5 se muestra la sección de monitoreo. Esta sección muestra las temperaturas de los dos sensores del horno, el sensor 1 corresponde al sensor ubicado en la parte inferior del horno y el sensor 2 al sensor de la parte superior. En la grafica de temperatura se observa que el sensor 1 llega más rápido a la temperatura deseada aproximadamente en 11 minutos ya que este sensor se encuentra más cerca de la fuente de calor. Al transcurrir el tiempo el gradiente de



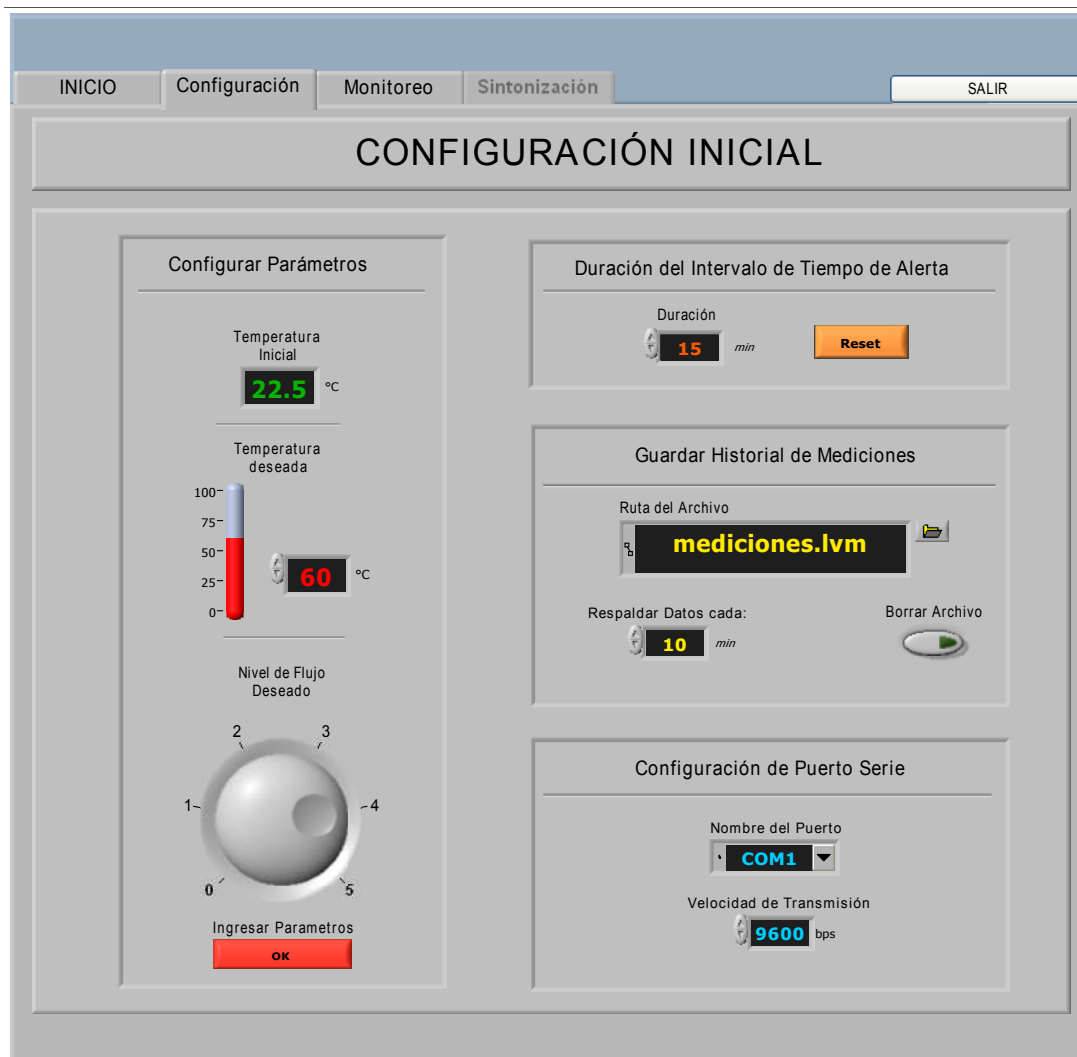


Figura 6.4: Sección de Configuración

temperatura entre los sensores decrece hasta que la temperatura es aproximadamente igual en los dos puntos de la cámara de secado después de aproximadamente 1 hora. También esta sección cuenta con tres indicadores que muestran si la temperatura es baja, alta o estable, además de indicar los tiempos de la alerta y el nivel de flujo de aire seleccionado.

La respuesta de una prueba más completa se observa en la figura 6.6. Inicialmente el usuario configura el horno con una temperatura deseada de 60 °C y un nivel de flujo de aire 4 (1.2 m/s), el sistema inicia su funcionamiento y la temperatura comienza a incrementarse, alrededor del minuto 11 la temperatura del sensor 1 llega a la temperatura deseada y al transcurrir el tiempo el gradiente de temperatura disminuye hasta que después de 1 hora es igual a 0.1 °C aproximadamente. Después de mantener el sistema a 60 °C más de una hora, se cambia la temperatura deseada a 50 °C con el fin de observar si el sistema ContHorno es capaz de controlar la temperatura estando en una temperatura inicial mayor a la deseada, lo cual realiza sin problemas.

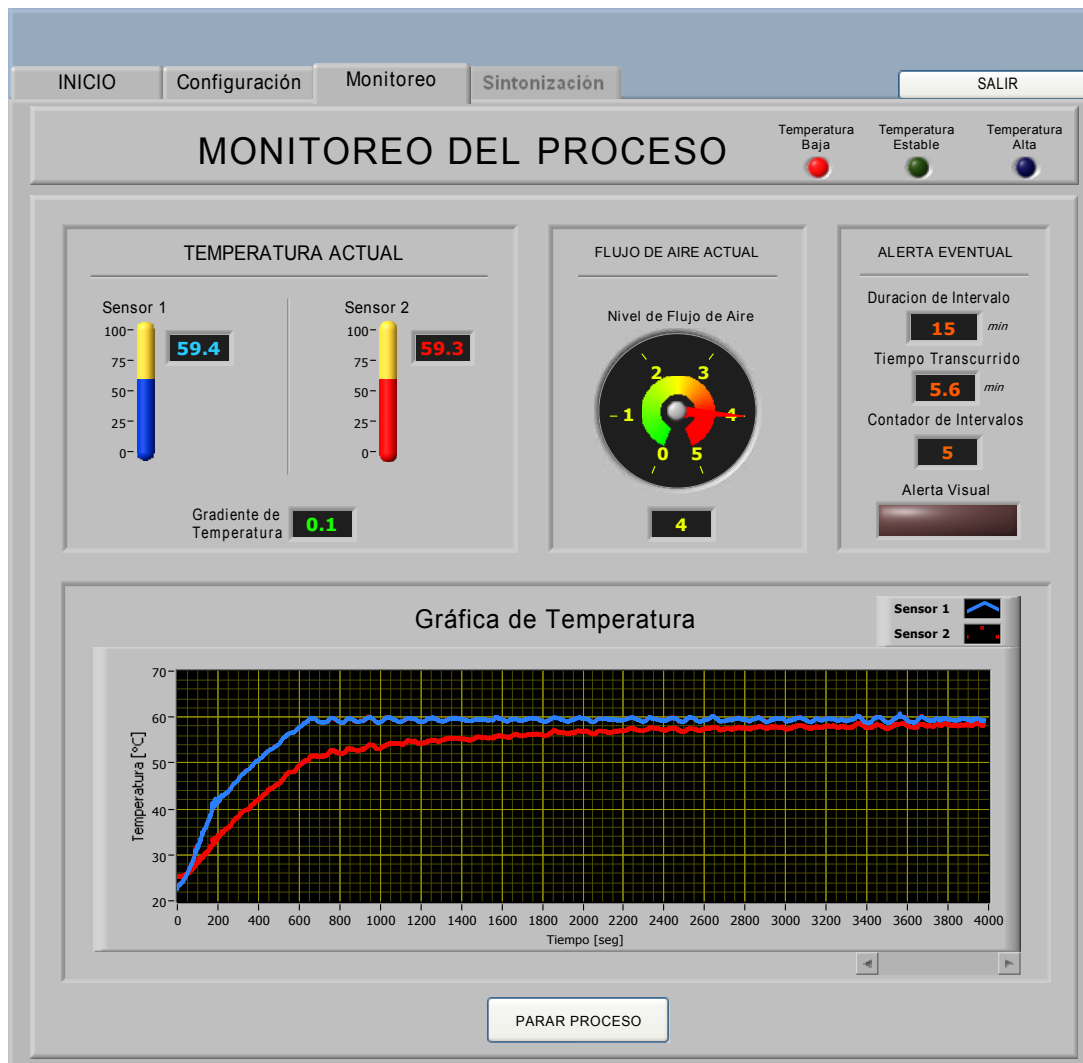


Figura 6.5: Sección de Monitoreo

Después de mantenerse 10 minutos aproximadamente en 50 °C, alrededor del segundo 5000 el usuario abre la puerta del secador durante 3 segundos, lo que representa una perturbación en el sistema, el sistema ContHorno también se repone sin problemas a esta perturbación. Después el usuario reconfigura nuevamente el sistema para verificar que el sistema ContHorno alcance los 75 °C lo cual es uno de los requerimientos del sistema, en la figura se observa que se alcanza esta temperatura sin problemas.

Todas las mediciones graficadas en la sección de monitoreo son guardadas en un archivo (en este caso cada 10 minutos) con el nombre mediciones.lvm en la ruta especificada por el usuario. Este archivo puede ser abierto con la ayuda de Excel o el bloc de notas.

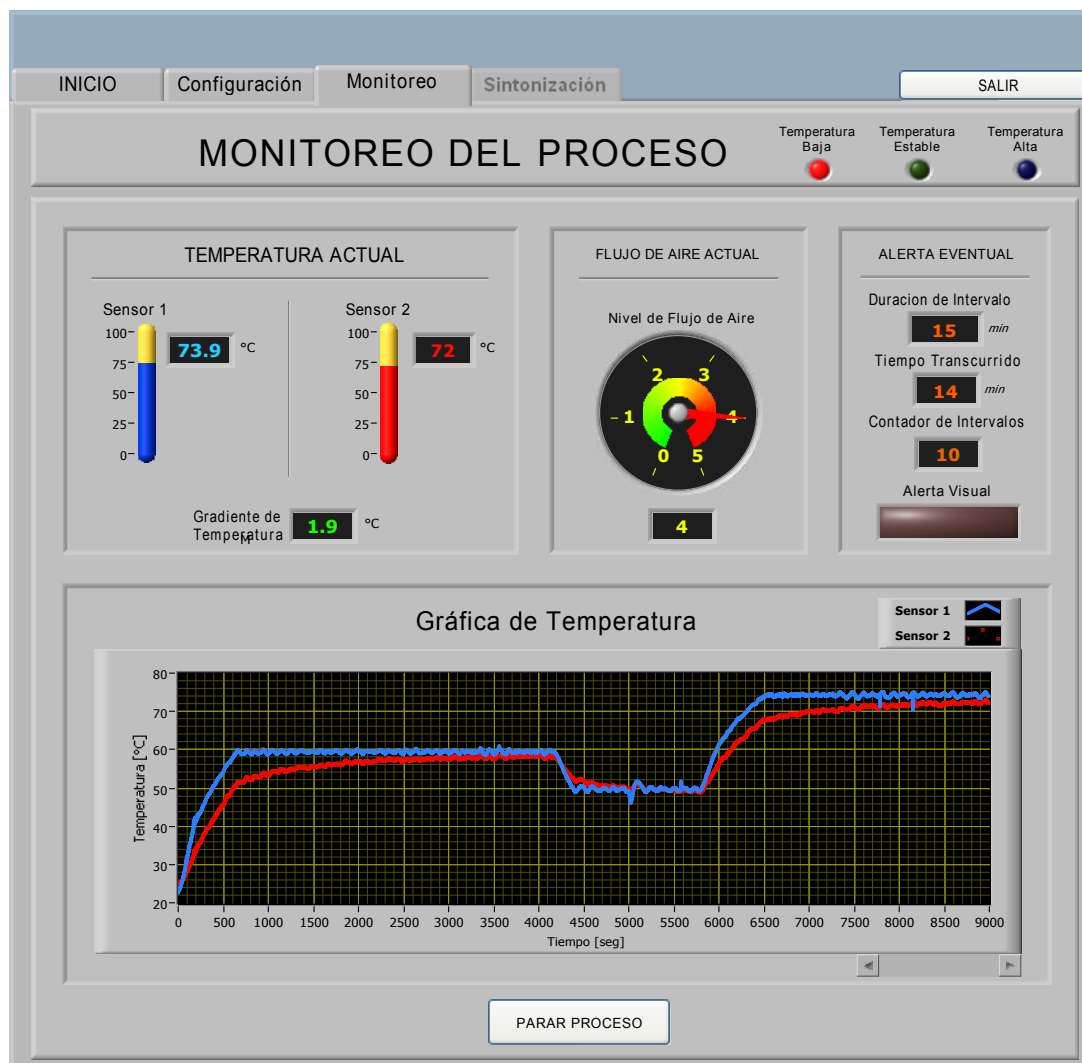


Figura 6.6: Prueba Completa de Monitoreo

## 6.4. Pruebas de Calibración

El proceso de deshidratado de alimentos requiere un flujo de aire constante durante todo el proceso de secado. Por lo que es necesario controlar el flujo de aire. En el caso del sistema ContHorno se llevo a cabo una calibración de flujo de aire indirecta debido a que no se encontró un sensor que trabaje bajo las condiciones en que opera el deshidratador.

Una calibración indirecta se refiere a que la medición se obtiene de una relación entre el parámetro físico que se quiere medir y otro que cuya variación produce un cambio en éste.

En el sistema ContHorno, el control del flujo de aire se realiza mediante un control tipo integral o por ciclos enteros. Esto facilita la calibración del flujo de aire, debido a que el flujo de aire producido por el ventilador dependerá del número de ciclos de CA que este encendido.

El periodo definido son 20 ciclos, por lo que para realizar la calibración se dejaron pasar de 0 a 20 ciclos y se obtuvo una relación entre el número de ciclos y el flujo de aire entregado por el ventilador. Esta relación es almacenada en la memoria EEPROM del MCU, así cuando el usuario ingresa un nivel de flujo de aire el MCU configura el número de ciclos activos del ventilador.

Las mediciones de flujo de aire se obtuvieron con la ayuda del Anemómetro digital Twilight modelo AVM-07 y su software Flow Anemometer v3.0 (figura 6.7) para la adquisición de datos [URL2]. La sonda del anemómetro se colocó en el orificio de salida del flujo de aire dentro de la cámara de secado y las mediciones se realizaron a puerta cerrada y sin charolas. En la figura 6.4 se muestra la colocación de la sonda del anemómetro.

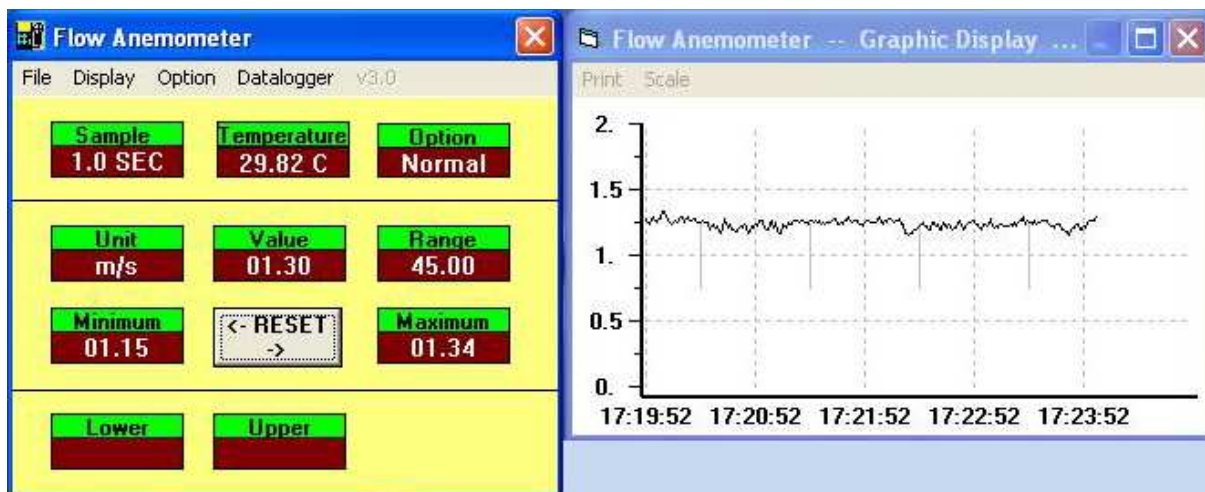


Figura 6.7: Software del Anemómetro

Para realizar la calibración del flujo de aire se implementó un programa para el MCU, el cual genera el número de ciclos que se configura desde su teclado. Se hizo un barrido de estos desde 0 a 20 ciclos con los cuales se varió la velocidad del ventilador y con ello el flujo de aire. El tiempo de monitoreo fue de 3 minutos. Lo mismo se repitió a diferentes horas del día con el fin de verificar la repetitividad de la medición. En la figura 6.7 se muestran las mediciones obtenidas con el anemómetro para 20 ciclos de CA, es decir cuando el ventilador se encuentra todo el tiempo encendido.

En la tabla 6.1 se muestran los promedios obtenidos en dos días diferentes a dos horas distintas (mañana y tarde).

De la tabla 6.1 se eligieron cinco niveles de flujo de aire a los que opera el deshidratador, en la tabla 6.2 se muestra la relación final que esta almacenada en la memoria del MCU.

La calibración del flujo de aire puede ser modificada desde la GUI proporcionada por el Soft-ContHorno en su sección de Sintonización. En la figura 6.9 se muestra la sección de sintonización

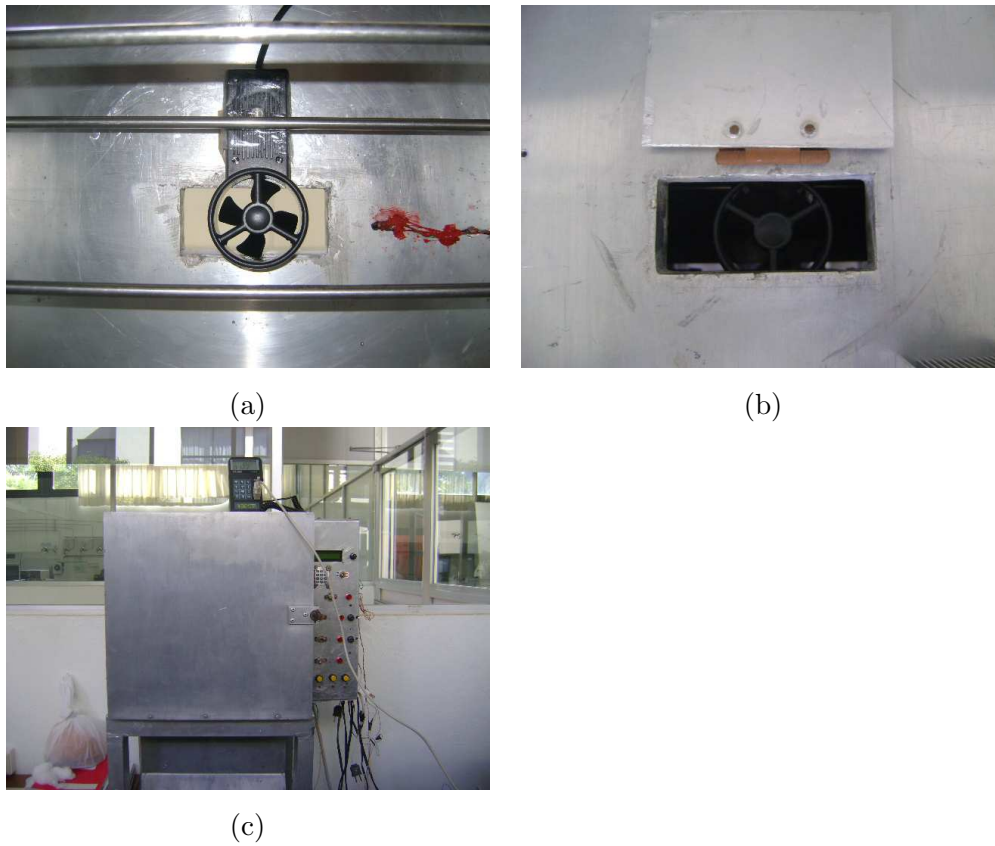


Figura 6.8: (a) Colocación de la sonda del anemómetro vista desde la cámara de secado. (b) Colocación de la sonda vista desde afuera del deshidratador. (c) Colocación del anemómetro para calibración.

en donde se observan dos tablas, en la primera el usuario después de dar clic en el botón “Leer Flujo de Aire” visualiza la calibración almacenada en el MCU y en la segunda tabla se ingresan nuevos valores que pueden ser cargados en el MCU.

Tabla 6.1: Calibración de Flujo de Aire

| Número<br>de Ciclos | Flujo de Aire [m/s] |       |        |       |
|---------------------|---------------------|-------|--------|-------|
|                     | Día 1               |       | Día 2  |       |
|                     | Mañana              | Tarde | Mañana | Tarde |
| 5                   | 0.36                | 0.4   | 0      | 0     |
| 6                   | 0.69                | 0.54  | 0.63   | 0.6   |
| 7                   | 0.9                 | 0.9   | 0.86   | 0.87  |
| 8                   | 1.03                | 1.0   | 0.97   | 0.99  |
| 9                   | 1.09                | 1.06  | 1.05   | 1.08  |
| 10                  | 1.15                | 1.11  | 1.12   | 1.1   |
| 11                  | 1.19                | 1.14  | 1.14   | 1.15  |
| 12                  | 1.22                | 1.17  | 1.17   | 1.18  |
| 13                  | 1.24                | 1.22  | 1.20   | 1.19  |
| 14                  | 1.26                | 1.23  | 1.21   | 1.2   |
| 15                  | 1.26                | 1.26  | 1.22   | 1.25  |
| 20                  | 1.3                 | 1.33  | 1.29   | 1.3   |

Tabla 6.2: Calibración de Flujo de Aire

| Nivel | No. de Ciclos | Flujo de Aire [m/s] |
|-------|---------------|---------------------|
| 1     | 0             | 0                   |
| 2     | 6             | 0.6                 |
| 3     | 8             | 1.0                 |
| 4     | 14            | 1.2                 |
| 5     | 20            | 1.3                 |



Figura 6.9: Sección de Sintonización





## Capítulo 7

# Conclusiones

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación del sistema de adquisición de datos y control del horno de charolas giratorias del laboratorio de Agroindustrias, el cual es usado para estudios de deshidratado de jitomate. Una vez concluido el trabajo de investigación estas son las conclusiones que se han obtenido:

- Se cumplió satisfactoriamente los objetivos propuestos mediante el diseño e implementación del ContHorno, el cual permite el control de temperatura y regulación de flujo de aire para el proceso de deshidratado de alimentos. Tiene la capacidad de ser configurado en forma local (panel frontal) o de forma remota (PC).
- Se decidió usar sensores de temperatura LM35 por ser de bajo costo y fáciles de acondicionar. Se obtuvieron resultados satisfactorios para la medición de temperatura y se comprobó que existen gradientes de temperatura entre la medición que arrojan cada uno de ellos.
- Una contribución importante fue la implementación de un controlador PI para el control de la temperatura. Éste se programó en el Microcontrolador Atmega16. Sin embargo al experimentar con el sistema, se observó que se tenían tiempos de respuesta muy largos, y se presentaban oscilaciones en la temperatura. La solución fue programar dos técnicas de control, es decir, si el error de temperatura era mayor a  $1^{\circ}\text{C}$  el control se hacia de tipo on-off; en caso contrario se usaba el control PI.
- La etapa de potencia fue mejorada con respecto a la anterior, ya que en este trabajo se utilizaron dispositivos electrónicos (Optoacoplador y Triac), en lugar de los relevadores. Además se programó un control de potencia de tipo PWM en AC (también conocido como integral).

- Durante la caracterización del flujo de aire en el horno, se descubrió que existe turbulencia dentro de la cámara de secado, lo que provoca una retención de aire caliente dentro de la misma. Este comportamiento favorece el proceso de deshidratado, ya que gracias a este comportamiento el gradiente de temperatura disminuye.
- El control y medición del flujo de aire es complicado debido a las condiciones a las que opera el horno, ya que no se encontró un sensor apropiado para dicha medición. La calibración de flujo de aire se realizó experimentalmente variando la potencia del ventilador y midiendo su efecto dentro del horno. Sin embargo no fue posible encontrar una ecuación que describa el flujo de aire de forma continua, por lo que la calibración se hizo por niveles de flujos de aire.
- El funcionamiento del horno mediante la PC, genera muchas prestaciones útiles para la investigación del deshidratado, ya que mediante el Soft-ContHorno se lleva a cabo la configuración, monitoreo y sintonización del horno. El programa fue desarrollado mediante el software de programación grafica LabVIEW 8.2 version estudiantil. Todas las mediciones de temperatura se guardan en un archivo para su posterior procesamiento.
- La sección de sintonización del Soft-ContHorno es una de las prestaciones más importantes del sistema, ya que se pueden modificar las constantes del controlador de temperatura y la calibración del flujo de aire. Éstas se encuentran almacenadas en la memoria del MCU y pueden ser reprogramadas sin necesidad de desmontar el MCU.
- Se montó un nuevo calefactor, con el cual la temperatura máxima es de 75 °C, el cual era uno de los objetivos de este trabajo.
- Todos los componentes electrónicos utilizados en este trabajo son comerciales con el fin de facilitar su mantenimiento y reparación.

## 7.1. Trabajos Futuros

- Cambiar el sistema de flujo de aire del horno, para evitar pérdidas por fugas y rechazo de aire, con el fin de que el flujo de aire dentro de la cámara de secado sea más estable y fácil de controlar.
- Desarrollar un sistema que permita medir dentro del horno el peso de cada muestra con el fin de automatizar más el proceso de deshidratado.
- Desarrollar un sistema que permita medir la viscosidad acuosa, dentro de la cámara de secado.

- 
- Rediseñar la cámara con el fin de que tenga mejores propiedades aerodinámicas. Si el sistema de calentamiento es igual se puede usar el mismo sistema sin muchas modificaciones.
  - Modelar el sistema del horno, con el fin de experimentar con nuevos algoritmos de control que mejoren los tiempos de respuesta del mismo.



# Bibliografía

- [1] ARENY, R. P. *Adquisición y Distribución de Señales*, primera ed. Marcombo S.A, Barcelona, 1993.
- [2] ATMEL CORPORATION. ATmega16L. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet Rev. 2466EAVR10/02, October 2002.
- [3] BENAVENT, J. M. G. *Electrónica de Potencia. Teoría y Aplicaciones*. AlfaOmega, 2000.
- [4] BOLTON, W. *Mecatrónica, Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*, segunda ed. AlfaOmega, Barcelona, 2001.
- [5] CREUS, A. *Instrumentación Industrial*, sexta ed. AlfaOmega, México, 1998.
- [6] DUFOUR, P. Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology* (2006), 889–904.
- [7] EVERLIGHT ELECTRONICS CO LTD. ITR8102. Datasheet DRX<sub>0</sub>81<sub>0</sub>04REV : 1,2, July2004.
- [8] FARCHILD SEMICONDUCTOR. MOC3031 6-PIN DIP ZERO-CROSS OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT. Datasheet ds300256, June 2001.
- [9] GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, tercera ed. Continental, S.A de C.V, México, 1998.
- [10] HART, D. W. *Electrónica de Potencia*, primera ed. Pearson Educacion S.A, Madrid, 2001.
- [11] HERRERA, A. P. Construcción de un secador de charolas giratorias y su valoración con ajo (*allium sativium* l.). Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, 2006.
- [12] HITACHI CO. HD44780U. Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver. Datasheet ADE-207-272(Z) '99.9 Rev. 0.0, 1998.

- 
- [13] IBRAHIM, D. *Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control*. Elsevier Science & Technology Books, 2002.
- [14] JAIMES, L. E. G. *Control digital. teoría y práctica*. Medellín.
- [15] KUO, B. C. *Sistemas de Control Automático*, séptima ed. Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1996.
- [16] N. ANDRITSOS, P. D. Y. N. K. Use of geothermal energy for tomato drying. *GHC Bulletin* (2006).
- [17] NATIONAL SEMICONDUCTOR. LM158/LM258/LM358/LM2904. Low Power Dual Operational Amplifiers. Datasheet TL/H/7787, December 1994.
- [18] NATIONAL SEMICONDUCTOR. LM35. Precision Centigrade Temperature Sensors. Datasheet ds005516, November 2000.
- [19] OGATA, K. *Ingeniería de Control Moderna*, tercera ed. Prentice Hall, México, 1998.
- [20] ORDAZ, G. V. *Medición y control de procesos industriales*, primera ed. Instituto Politécnico Nacional, México, 2006.
- [21] OTI-BOATENG, PEGGY Y AXTEL, B. *Técnicas de Secado*, segunda ed. ITDG, Lima, Peru, 1998.
- [22] PALLAS, R. A. *Sensores y acondicionadores de señal*, cuarta ed. Marcombo, 2007.
- [23] PRESSMAN, R. S. *Ingeniería de Software*, quinta ed. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U, Madrid, 2002.
- [24] SEMICONDUCTORS, M. Max232. +5v-powered, multichannel rs-232drivers/receivers. Datasheet 19-4323; Rev 11; 2/03, February 2003.
- [25] SINCLAIR, I. R. *Sensors and Transducers*, tercera ed. Newnes, Oxford, 2001.
- [26] SOMMERVILLE, I. *Ingeniería de Software*, séptima ed. Pearson Educacion S.A, Madrid, 2005.

# URL's

- [27] Impalab, s.a de c.v. <http://inter-forma.com/impalab/contacto.html>. Fecha de consulta 07 de Febrero de 2009.
- [28] Introducción a la electrónica de potencia, reguladores e interruptores estáticos de alterna. <http://www.uv.es/emaset/iep00/temario.htm>. Fecha de Consulta 25 de Agosto de 2010.
- [29] Revisión bibliográfica. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/ortiz\\_a\\_bs/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/capitulo2.pdf). Fecha de Consulta 04 de Marzo de 2009.
- [30] Twilight, s.a de c.v. [http://www.twilight.com.mx/OE/ANEMOMETRO/Anemometro\\_AVM07.htm](http://www.twilight.com.mx/OE/ANEMOMETRO/Anemometro_AVM07.htm). Fecha de Consulta 25 de Febrero de 2009.
- [31] Wikipedia, la enciclopedia libre. <http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>. Fecha de Consulta 26 de Febrero de 2009.





## Apéndice A

# Manual de Usuario del Control del Horno

El sistema ContHorno tiene dos modos de funcionamiento el modo local y el modo remoto, el cual es seleccionado después del encendido mediante el teclado cuando se despliega en el LCD la información. Para seleccionar modo local presionar la tecla 1 y para elegir modo remoto presionar la tecla 2.

En modo manual se configura todas las opciones de configuración del horno desde el panel frontal del mismo. En modo remoto la configuración se hace desde el programa de control que corre en una computadora personal. En este último modo se tiene la capacidad de guardar el historial de la temperatura y configurar los parámetros de control del firmware del controlador. A continuación se describen cada uno de ellos.

### A.1. Modo de Operación Local

La configuración en modo manual hace uso del LCD y el teclado que tiene el horno en su panel frontal. En la figura [A.1](#) se muestra el panel frontal del horno con todas sus partes, las cuales se enumeran a continuación.

1. Switch de Encendido/Apagado e indicador.
2. Display de Cuarzo Líquido (LCD).
3. Teclado Matricial.

4. Reset.
5. Switch de Encendido/Apagado de giro de charolas e indicador.
6. Led indicador de control de temperatura.

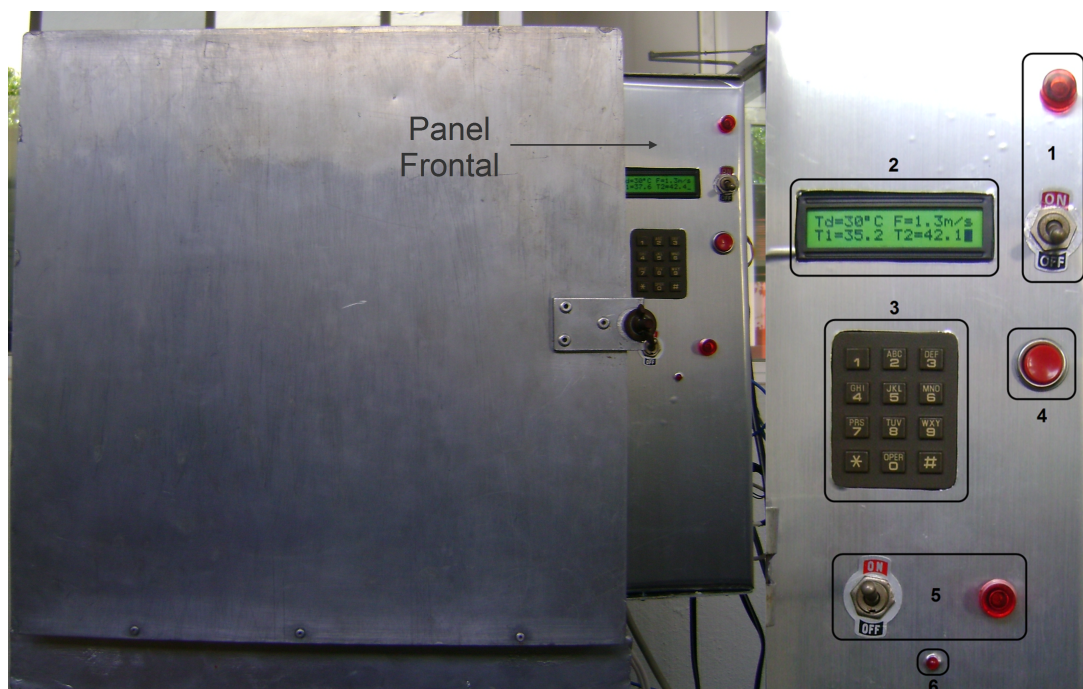


Figura A.1: Panel Frontal del Secador

Para explicar la forma en que se hace la configuración se hizo el diagrama de flujo de la figura [A.2](#). Éste muestra los pasos necesarios para realizar la configuración del secador.

Lo primero que se tiene que hacer es conectar el secador al toma corriente. Posteriormente se enciende con interruptor Enc/Apag situado en el panel frontal. En el LCD se visualiza el nombre del equipo, la temperatura inicial y la selección de modo.

El usuario seleccionará el modo de funcionamiento mediante el teclado, si presiona la tecla 1 el secador se inicia en modo local y si presiona la tecla 2 se inicia en modo remoto. En modo local se configura la temperatura deseada y el nivel de flujo de aire para el deshidratado mediante el teclado. El nivel de flujo de aire va de 1 a 5 y sus respectivas equivalencias se muestran en la tabla [A.1](#).

## A.2. Modo de Operación Remoto

Para llevar a cabo la configuración del horno desde la PC es necesario primero conectar el horno al tomacorriente y encender el equipo, de igual manera es necesario encender la PC,

Tabla A.1: Calibración de Flujo de Aire

| Nivel | Flujo de Aire [m/s] |
|-------|---------------------|
| 1     | 0                   |
| 2     | 0.6                 |
| 3     | 1.0                 |
| 4     | 1.2                 |
| 5     | 1.3                 |

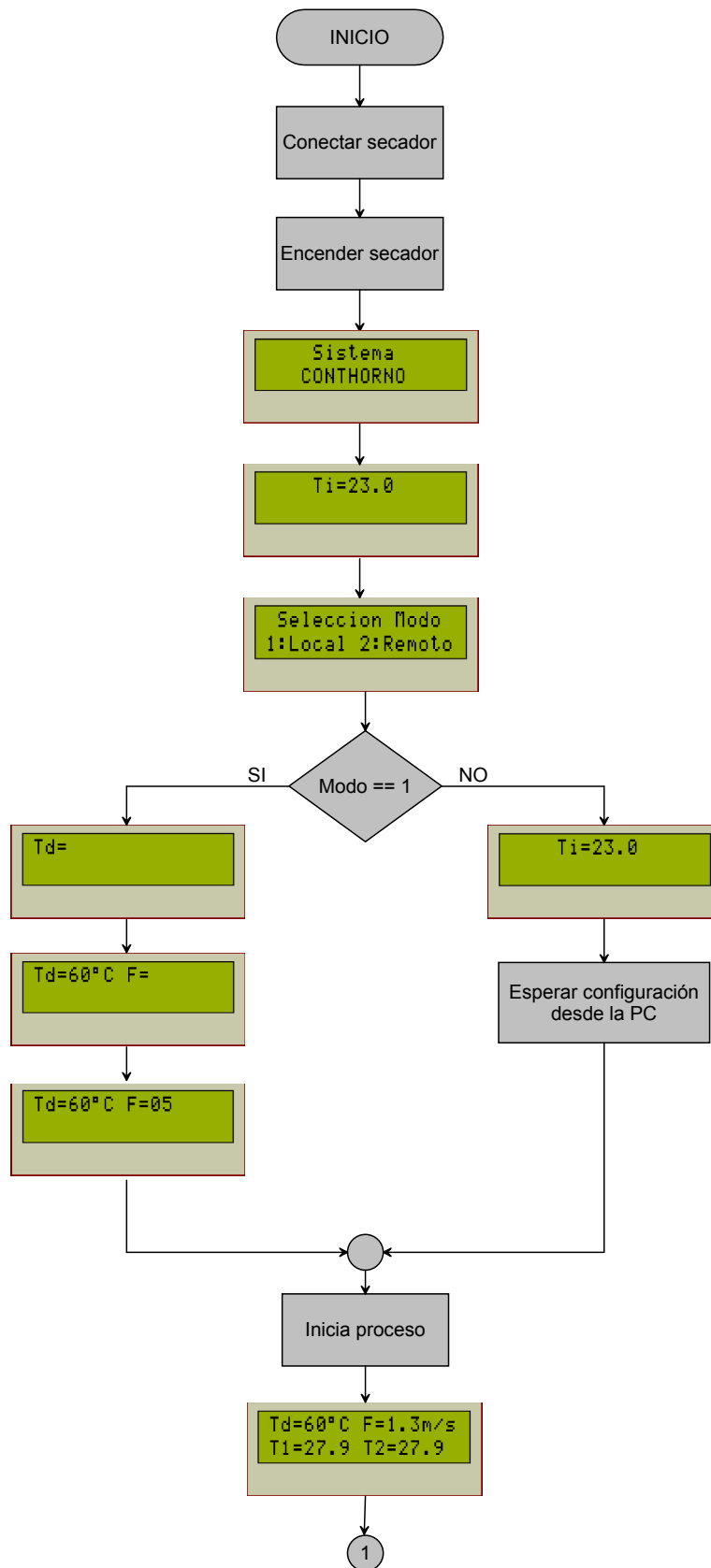
verificar la conexión entre el horno y la PC, y ejecutar el programa Soft-ContHorno. En el LCD del panel frontal del horno se visualiza el nombre del equipo, la temperatura inicial y la selección de modo. El modo remoto se selecciona presionando la tecla 2, después de seleccionar el modo, la configuración del horno es controlada desde la PC, quedando deshabilitado el panel frontal. En la figura [A.3](#) se muestra el diagrama de flujo que muestra la forma de configurar el horno en modo remoto.

A continuación se describe de forma detallada la manera de utilizar el Soft-ContHorno:

1. Ejecutar el Soft-ContHorno.
2. En la sección de INICIO del Soft-ContHorno seleccionar el tipo de usuario Administrador u Operador y dar clic en OK.
3. En caso de haber seleccionado tipo de usuario Administrador, introducir la contraseña. Si selecciono tipo de usuario Operador saltar al siguiente paso.
4. En la sección de Configuración del Soft-ContHorno el usuario puede configurar varios parámetros lo más importantes son:
  - Temperatura deseada.
  - Nivel de Flujo de Aire deseado.
  - Duración del intervalo para la Alerta.
  - Periodo de tiempo para cada respaldo de datos.

En la figura [A.4](#) se muestra la sección de Configuración. En este caso se selecciono una temperatura deseada de 60°C, un nivel de flujo de aire 4, una alerta cada 15 minutos y respaldo de información cada 60 minutos con lo cual el historial de mediciones se respaldará cada hora en Data.lvm. Los parámetros restantes se dejan con su valor default.

En esta sección el usuario debe configurar obligatoriamente los parámetros: temperatura deseada y nivel de flujo de aire.



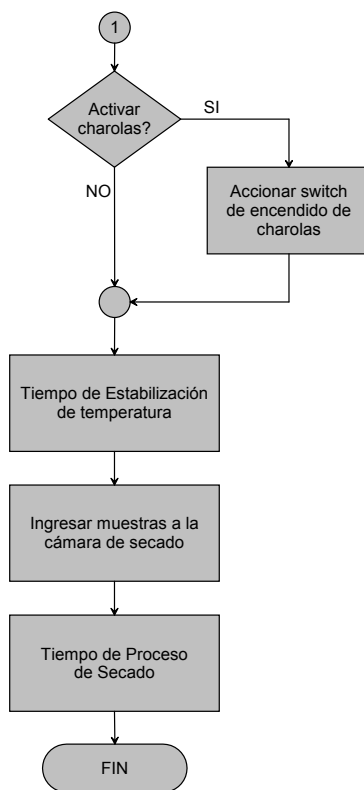
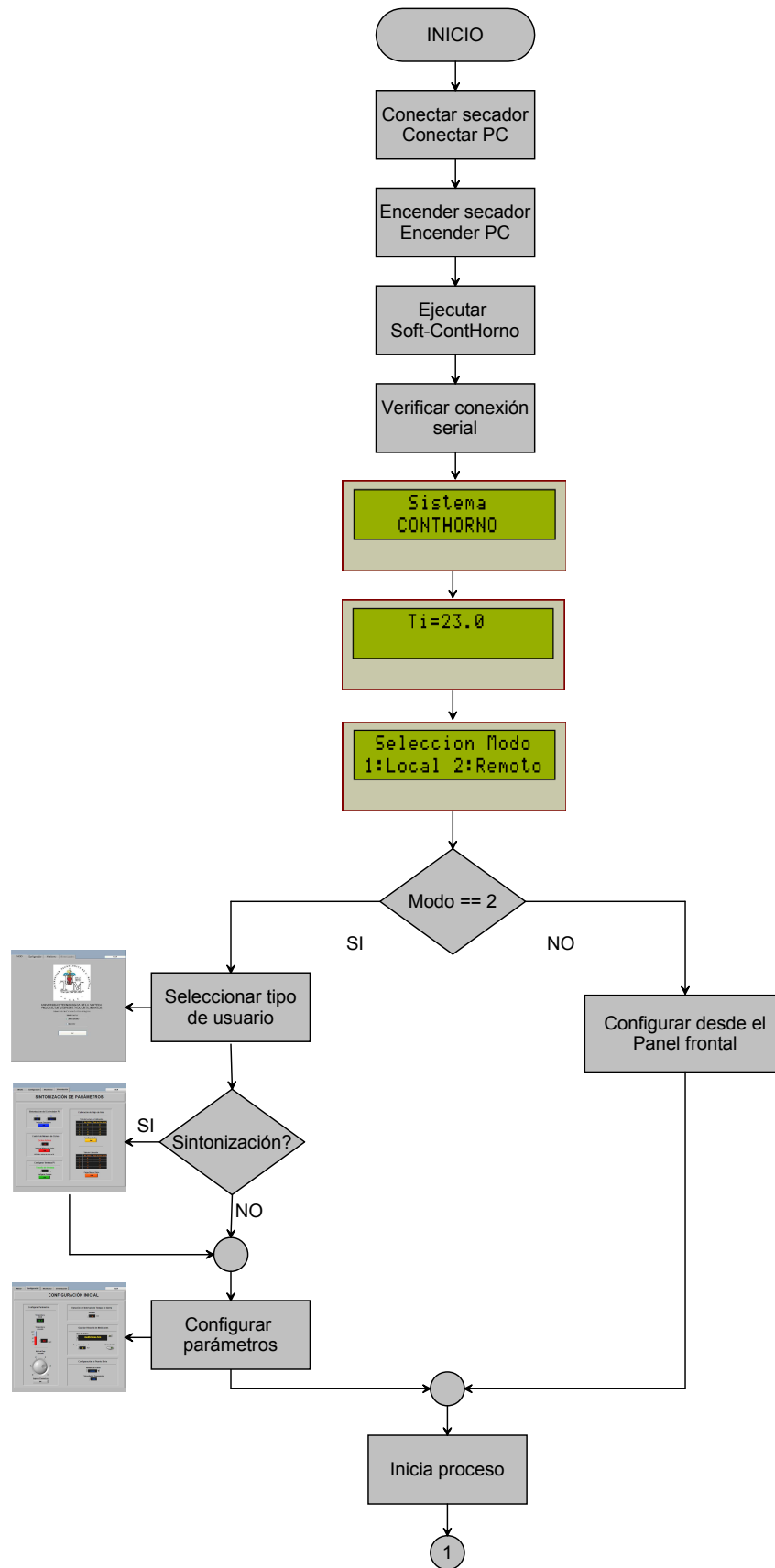


Figura A.2: Diagrama de flujo de configuración en modo local

5. Dar clic en el botón Ingresar Parámetros para configurar el proceso.
6. El Soft-ContHorno se dirigirá automáticamente a la sección Monitoreo. En ésta el usuario visualiza la grafica de temperatura en la cámara de secado con respecto al tiempo, el nivel de flujo deseado, la configuración y tiempo transcurrido para la alerta, así como el estado en el que se encuentra la temperatura. Lo anterior se puede observar en la figura [A.5](#).
7. Para reconfigurar los parámetros del proceso seleccionar la sección Configuración y regresar al paso 4.
8. Para terminar el proceso dar clic en el botón “Parar Proceso” ubicado en la sección de Monitoreo.
9. En caso de haber iniciado como Administrador se tiene acceso a la sección Sintonización en donde se puede cambiar parámetros del control de temperatura, visualizar la calibración de flujo de aire actual y recalibrar el flujo de aire. Esto se observarse en la figura [A.6](#).

Nota: Es importante que cualquier cambio en la sección Sintonización sea realizado por personal autorizado. Ya que al modificar los parámetros desde esta interfaz se cambian los parámetros almacenados en el microcontrolador lo que modifica el comportamiento del sistema ContHorno.



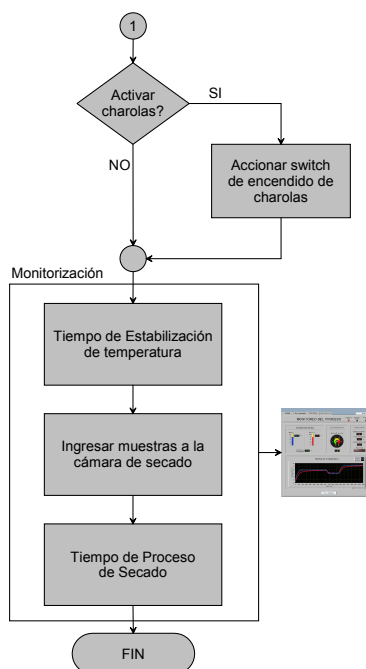


Figura A.3: Diagrama de flujo de configuración en modo remoto



Figura A.4: Sección de Configuración de Parámetros

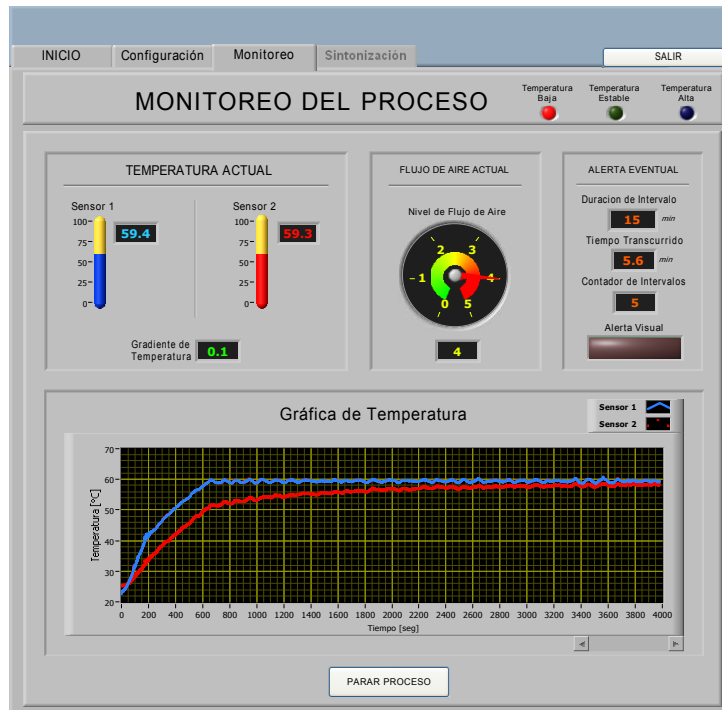


Figura A.5: Sección de Monitoreo



Figura A.6: Sección de Sintonización



# Apéndice B

# Manual de Hardware

El sistema ContHorno permite llevar a cabo la adquisición de datos y control del proceso de deshidratado de alimentos. Este sistema consta de 5 bloques. El diagrama a bloques del hardware se muestra en la figura [B.1](#).

- Horno. Es una estructura mecánica que está construida de lámina de acero inoxidable, lamina de aluminio y placas de poliestireno expandido. En este bloque están instalados los actuadores, los sensores y el panel frontal.
- AcondS-PCB. Es el circuito impreso de la etapa de acondicionamiento de señal.
- Pot-PCB. Es el circuito impreso de la etapa de potencia.
- ProcessCom-PCB. Es el circuito impreso de la etapa de procesamiento junto con la etapa de comunicación serial.
- Computadora. Es la encargada de llevar a cabo el monitoreo en modo remoto. La conexión entre ProcessCom-PCB y la PC se lleva a cabo mediante un cable serial.

En este manual se explica solo el AcondS-PCB, Pot-PCB y ProcessCom-PSCB que se describen a continuación.

## B.1. AcondS-PCB

Es el circuito impreso de la etapa de acondicionamiento de señal, la cual se encarga de adaptar las señales analógicas de los sensores y del detector de cruce por cero para que sean

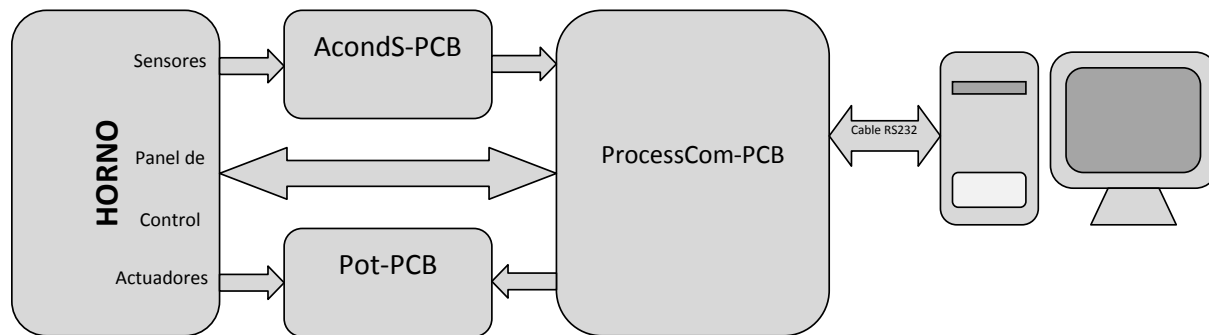


Figura B.1: Diagrama a bloques del hardware

procesadas por el MCU. En la figura B.2 se muestra el diagrama esquemático, en la figura B2(a) el diagrama de montaje, en la B2(b) el diagrama de pistas en la figura B2(c) y (d) la vista superior e inferior de la placa terminada. En la tabla B1 se muestra el listado de componentes de esta etapa.

En los conectores de 3 terminales (J1 y J2) se conectan los sensores de temperatura superior e inferior, que se encuentran en la cámara de secado del horno. En el conector J3 se conecta la salida del transformador que sirve para reducir el voltaje de línea para realizar el detector de cruce por cero de la señal de alimentación. Al conector J4 se conectan las salidas de esta etapa, es decir, la señal de los sensores acondicionadas y el detector de cruce por cero, estas señales van directamente al conector J5 del ProcessCom-PCB. El conector J5 es la alimentación (12 V y tierra) y el conector J6 son pines de prueba para verificar las señales de salida.

La figura B.3 muestra el PCB prototipo y el PCB obtenido después de procesar y armar el prototipo.

## B.2. Pot-PCB

Es el circuito impreso de la etapa de potencia del sistema. Su función es brindar la potencia necesaria a los actuadores, en este caso a los dos calefactores y el ventilador.

En el conector J1 llegan una señal de valor 5 V y la señal de control de los calefactores, la cual activaran al Optoacoplador y sucesivamente al TRIAC1 y TRIAC2 que activaran las resistencias calefactoras conectadas en conector J3 y J4 como se muestra en el diagrama esquemático. En el conector J2 llegan una señal de valor 5 V y la señal de control que activara al Optoacoplador y sucesivamente al TRIAC3 que activará al ventilador conectado según el diagrama esquemático en el conector J5.

La figura B.5 muestra el PCB prototipo y el PCB obtenido después de procesar y armar el prototipo.



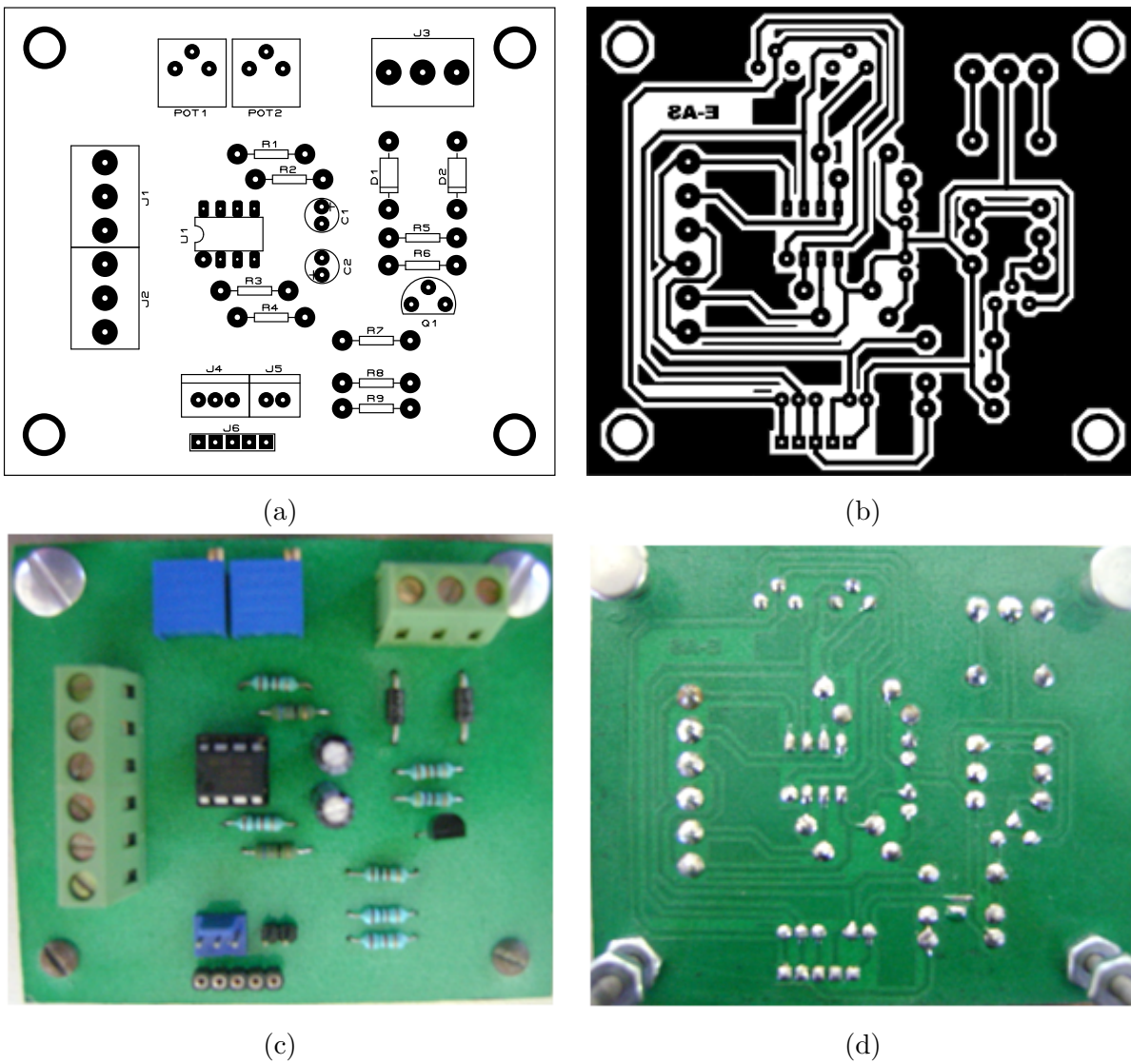


Figura B.3: (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real.

La figura B.7 muestra el PCB prototipo y el PCB obtenido despues de procesar y armar el prototipo.

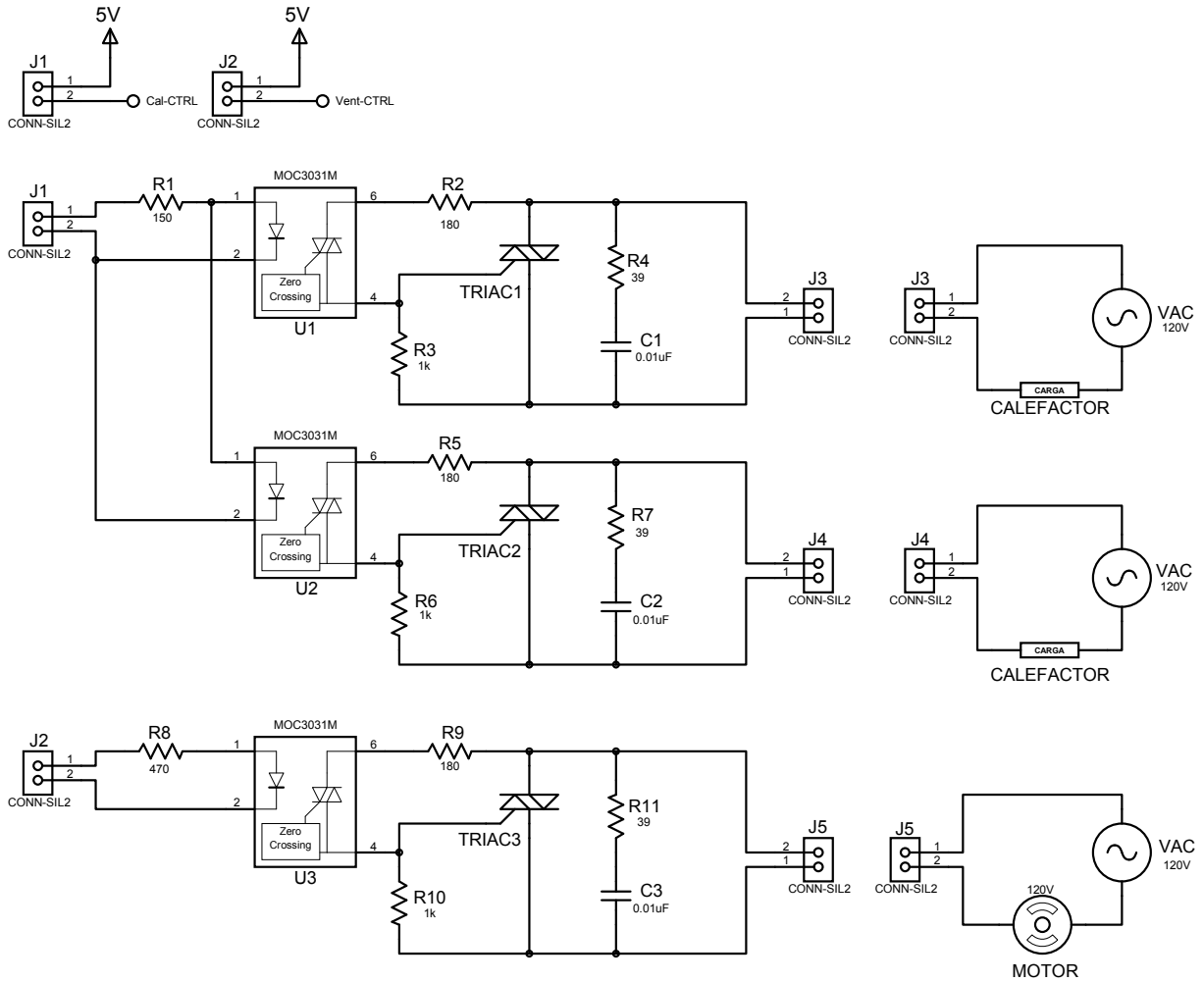


Figura B.4: Diagrama esquemático del AcondS-PCB

Tabla B.1: Cotización del EAS-PCB

| Cant. | Referencia        | Descripción                               | Modelo      | Precio por Unidad [€] | Proveedor         |
|-------|-------------------|---|-------------|-----------------------|-------------------|
| 3     | J1, J2, J3        | Terminal de tres tornillos para PCB       | TRTG-03     | 3.448                 | AG<br>Electrónica |
| 2     | POT1,<br>POT2     | Trimpot cuadrado de 20 vueltas de 10 kOhm | 3299P-1-103 | 20.690                | AG<br>Electrónica |
| 1     | U1                | Amplificador dual de baja potencia        | LM358N      | 3.448                 | AG<br>Electrónica |
| 2     | U2, U3            | Sensor de Temperatura                     | LM35DZ      | 17.241                | AG<br>Electrónica |
| 2     | C1, C2            | Capacitor electrolítico 10 uF / 63 V      | CE-10/63V   | 2.586                 | AG<br>Electrónica |
| 2     | D1, D2            | Diodo rectificador 1 A / 200 V            | 1N4003      | 0.862                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | J4                | Conector molex de 3 vias macho            | 22-6103     | 3.00                  | Robodacta         |
| 1     | J4                | Conector molex de 3 vias hembra           | 22-6003     | 3.00                  | Robodacta         |
| 1     | J5                | Conector molex de 2 vias macho            | 22-6102     | 3.00                  | Robodacta         |
| 1     | J5                | Conector molex de 2 vias hembra           | 22-6002     | 3.00                  | Robodacta         |
| 10    |                   | Terminal para conector molex              | 22-6612     | 0.50                  | Robodacta         |
| 1     | Q1                | Transistor Si-NPN 60V 0.2A 0.35W 300MHz   | 2N3904      | 2.586                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | R10               | Resistencia de 1.2 kOhm                   | RC-1k2/1/2  | 0.862                 | AG<br>Electrónica |
| 4     | R1, R3, R5,<br>R9 | Resistencia de 1 kOhm                     | RC-1k/1/2   | 0.862                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | R7                | Resistencia de 470 Ohm                    | RC-470E/1/2 | 0.862                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | R6                | Resistencia de 330 Ohm                    | RC-330E/1/2 | 0.862                 | AG<br>Electrónica |
| 2     | R2, R4            | Resistencia de 68 Ohm                     | RC-68E/1/2  | 0.862                 | AG<br>Electrónica |

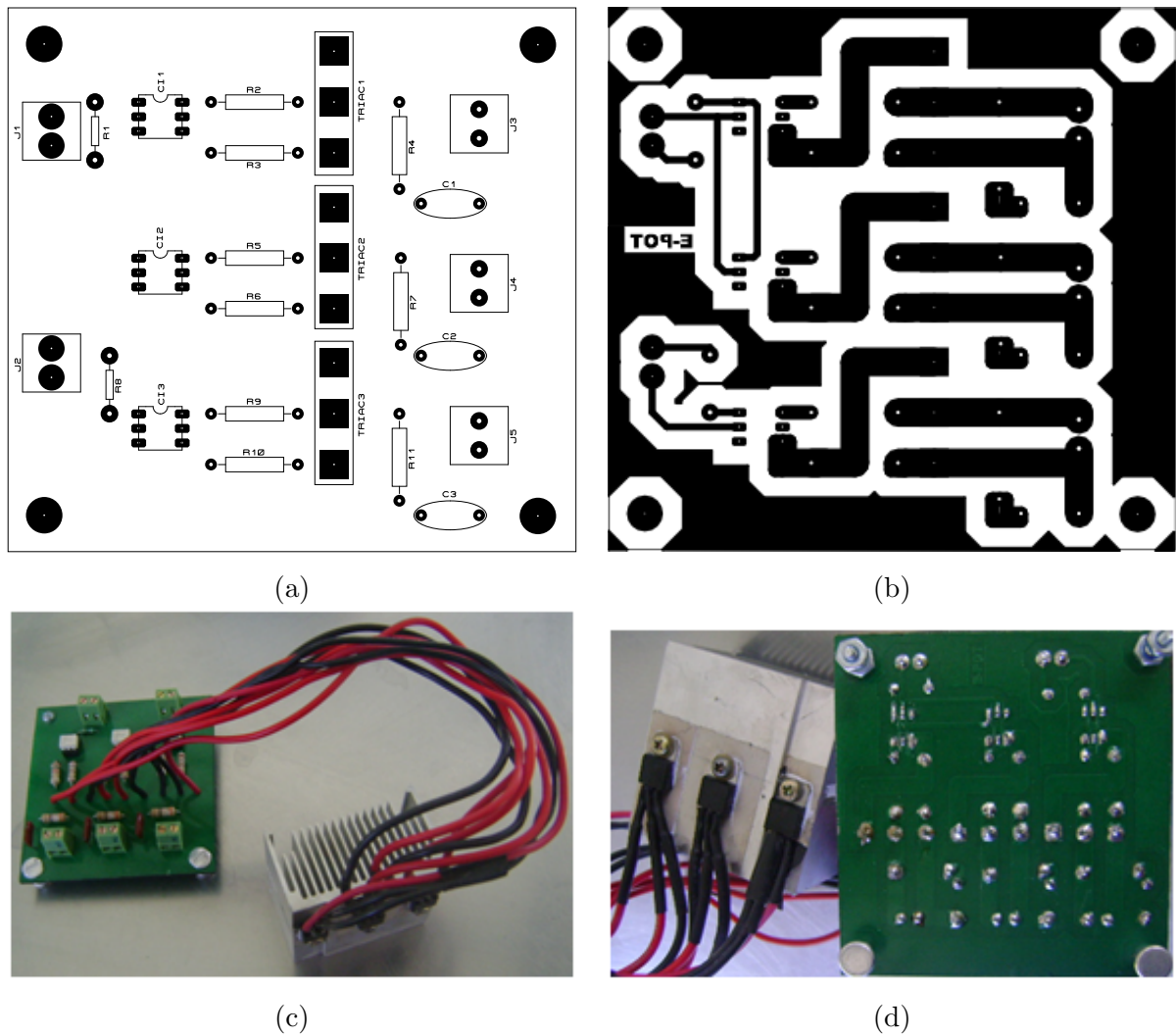


Figura B.5: (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real.

Tabla B.2: Cotización del EPOT-PCB

| Cant. | Referencia            | Descripción                                  | Modelo          | Precio por Unidad [\$] | Proveedor         |
|-------|-----------------------|--|-----------------|------------------------|-------------------|
| 5     | J1, J2, J3,<br>J4, J5 | Terminal de dos tornillos para PCB           | TRTG-02         | 2.586                  | AG<br>Electrónica |
| 3     | U1, U2, U3            | Optoacoplador con detector de cruce por cero | MOC3031         | 9.483                  | AG<br>Electrónica |
| 2     | TRIAC1,<br>TRIAC2     | TRIAC 16 A - 400 V                           | BTA16           | 12.931                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | TRIAC3                | TRIAC 8 A - 400 V                            | BTA08           | 10.345                 | AG<br>Electrónica |
| 1     | R1                    | Resistencia de 150 Ohm                       | RC-<br>150E/1/2 | 0.862                  | AG<br>Electrónica |
| 1     | R8                    | Resistencia de 470 Ohm                       | RC-<br>470E/1/2 | 0.862                  | AG<br>Electrónica |
| 3     | R2, R5, R9            | Resistencia de 180 Ohm                       | RC-<br>180E/1W  | 1.724                  | AG<br>Electrónica |
| 3     | R3, R6,<br>R10        | Resistencia 1 kOhm                           | RC-1k/1W        | 1.724                  | AG<br>Electrónica |
| 3     | R4, R7,<br>R11        | Resistencia de 39 Ohm                        | RC-39E/1W       | 1.724                  | AG<br>Electrónica |
| 3     | C1, C2, C3            | Capacitor de poliéster<br>10 nF 250 V        | CP-<br>.01/250V | 2.586                  | AG<br>Electrónica |



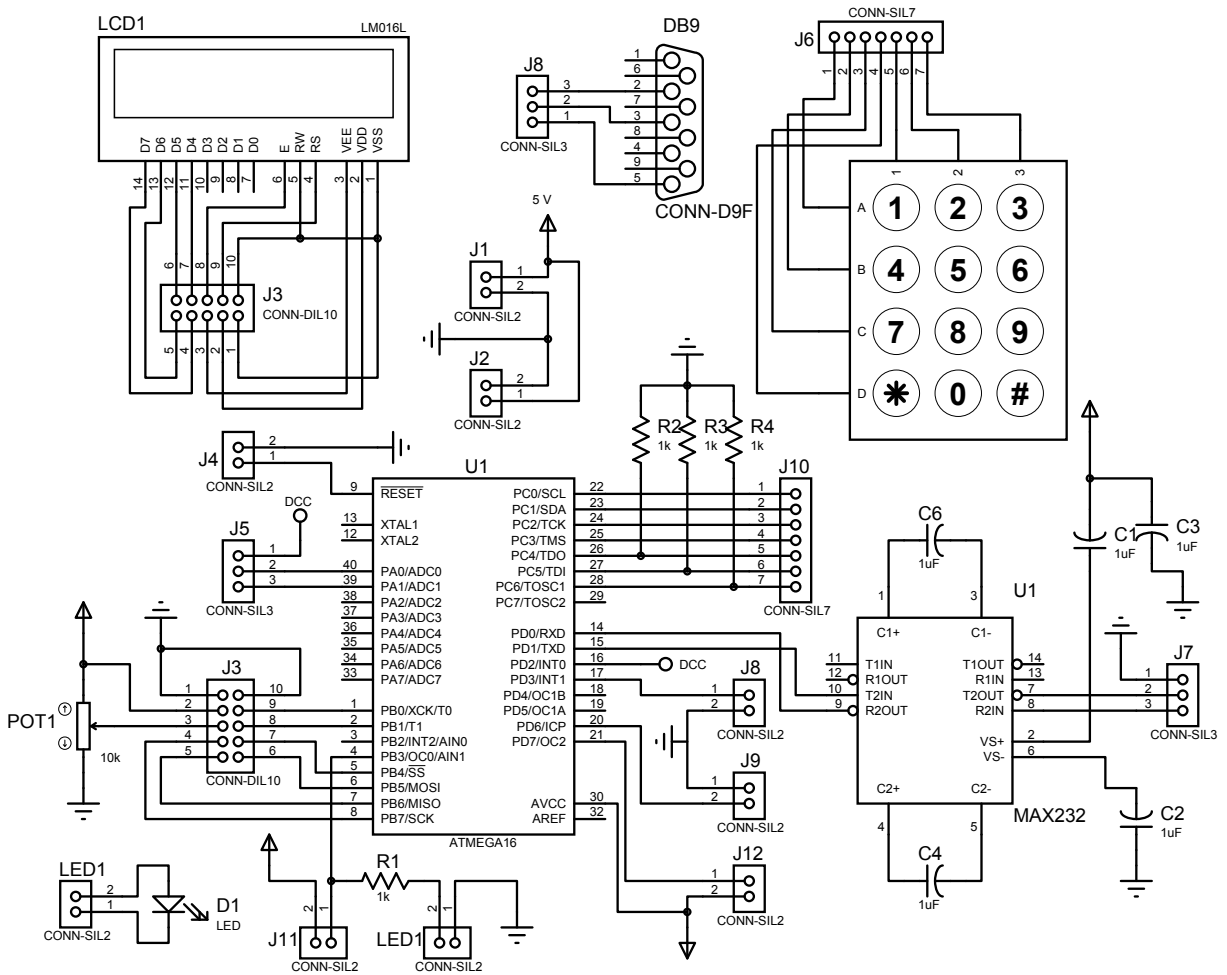
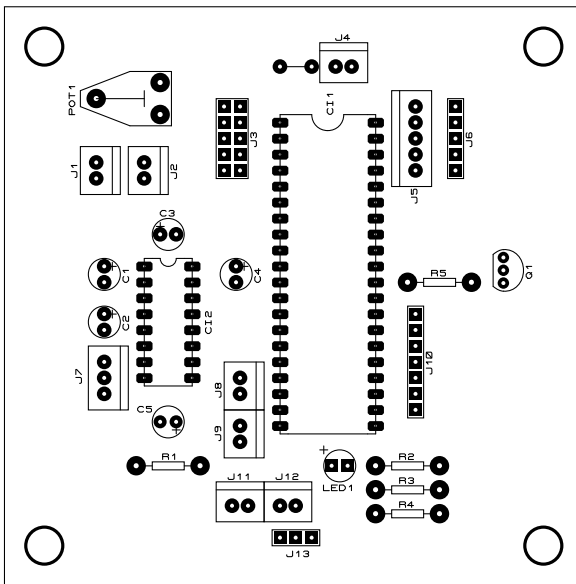
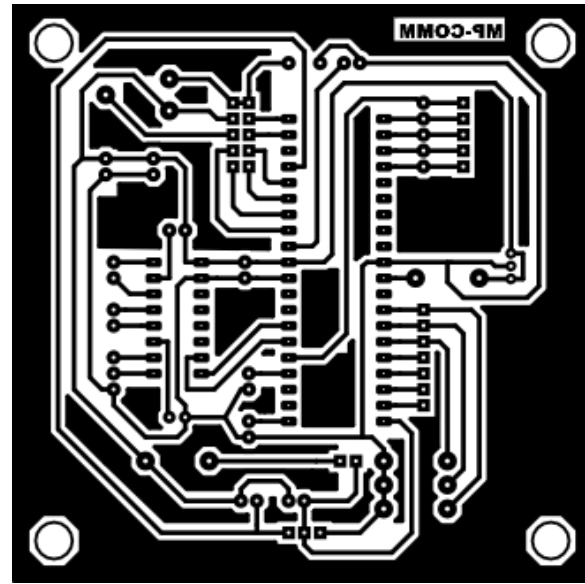


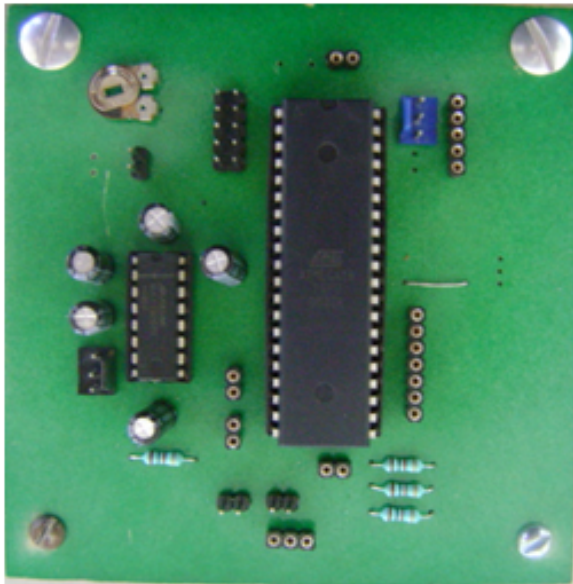
Figura B.6: Diagrama esquemático del ProcessCom-PCB



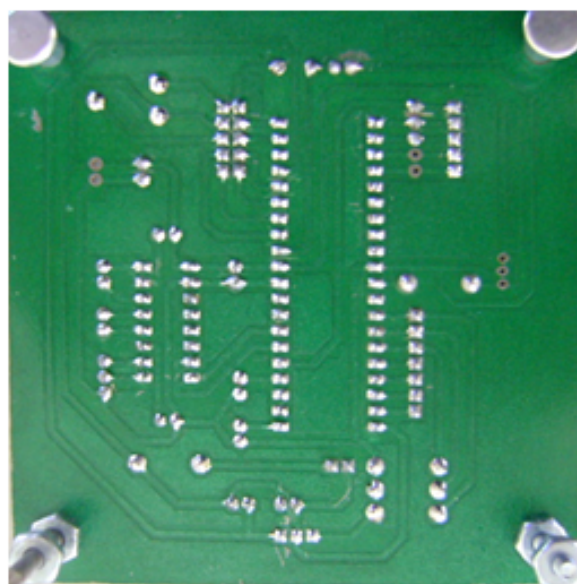
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura B.7: (a) Vista Superior del PCB. (b) Vista Inferior del PCB. (c) Vista Superior del PCB real. (d) Vista Inferior del PCB real.

Tabla B.3: Cotización del ProcessCom-PCB

| <b>Cant.</b> | <b>Referencia</b>      | <b>Descripción</b>                      | <b>Modelo</b> | <b>Precio por<br/>Unidad [\$]</b> | <b>Proveedor</b>  |
|--------------|------------------------|---|---------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1            | U1                     | Microcontrolador de 8 bits Atmega16     | Atmega16      | 75.862                            | AG<br>Electrónica |
| 3            | U2                     | Interface RS232                         | MAX232        | 11.207                            | AG<br>Electrónica |
| 5            | C1, C2, C3,<br>C4, C5  | Capacitor Electrolítico 1 uF/63 V       | CE-1/63 V     | 2.586                             | AG<br>Electrónica |
| 4            | R1, R2, R3,<br>R4      | Resistencia de 1 kOhm                   | RC-1k/1/2     | 0.862                             | AG<br>Electrónica |
| 2            | J5, J7                 | Conector Molex de 3 vias hembra         | 22-6003       | 4.00                              | Robodacta         |
| 2            | J5, J7                 | Conector Molex de 3 vias macho          | 22-6103       | 4.00                              | Robodacta         |
| 6            | J5, J7                 | Terminal para conector molex            | 22-6212       | 0.50                              | Robodacta         |
| 1            | J4, J6, J8,<br>J9, J10 | Pines Torneados                         | 40PF/LINEA    | 11.207                            | AG<br>Electrónica |
| 1            | J1, J2, J11,<br>J12    | Tira de Pines                           | HEADER-1      | 2.586                             | AG<br>Electrónica |
| 1            | J3                     | Tira de pines dobles                    | HEADER-2      | 5.172                             | AG<br>Electrónica |
| 1            | POT1                   | Preset horizontal preajustable de 1kOhm | 111-1k        | 6.0                               | Steren            |