



TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE MÁSTER EN CIENCIAS

TÍTULO: *Diseño de un sistema de supervisión y control para el secador solar tipo invernadero, en el Centro de Investigación de Energía Solar*

AUTOR: Ing. Heber Rivas Prieto

TUTORES: Dra. Ania Lussón Cervantes

Santiago de Cuba
“Año 57 de la Revolución”

DEDICATORIA

A toda mi familia, en especial a mi padre y mi madre.

A mi hermano.

A mis abuelos.

A mi novia, por ser tan paciente.

A todos mis amigos por estar siempre presente.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Ania Lusson y Enrique Castro, por el tiempo dedicado, y por ser tan exigentes.

A mis compañeros de trabajo, en especial a Camejo, por brindarme siempre todas las facilidades para la culminación de esta investigación.

A mi familia y amigos que me dieron todo el apoyo necesario.

A todo aquel que contribuyó.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

En este trabajo se expone el diseño de un sistema de supervisión y control para el secador solar tipo invernadero, perteneciente al Centro de Investigación de Energía Solar (CIES). Donde se diseña e implementa una tarjeta de adquisición y control basada en un microcontrolador PIC. La misma permite la medición de las variables más importantes presentes en el proceso de secado, así como el control de la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado. También se desarrolla una aplicación para realizar la supervisión del proceso, empleando para ello el LabWindows CVI 9.0.

ABSTRACT

In this work is exposed the design of a monitoring and control system for greenhouse solar dryer, on the Research Center of Solar Energy (CIES). Where is designed and implemented a card acquisition and control based on a PIC microcontroller. It allows the measurement of most important variables in the drying process and control the temperature and relative humidity inside the drying chamber. We also develop an application for monitoring the process, employing the LabWindows CVI 9.0.

NOTACIONES GENERALES

CA: Corriente Alterna

CAD: Convertidor Analógico Digital

CANBUS: Controller Area Network

CD: Corriente Directa

CPU: Unidad Central de Procesamiento

FLASH: Memoria no Volátil

GSM: Global System for Mobile communications

LSB: Least Significant Bit

MSB: Most Significant Bit

PC: Personal Computer

PCI: Peripheral Component Interconnect

PIC: Peripheral Interface Controller

PWM: Modulación por Ancho de Pulso

RISC: Reduced Instruction Set Computer

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

SLEEP: El microcontrolador pasa al modo en espera

VCC: Voltaje positivo de la fuente de alimentación

WIFI: Wireless Fidelity

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Caracterización de los secadores solares y los sistemas de supervisión y control	4
Introducción	4
1.1 Secadores solares	4
1.1.1 Clasificación de los secadores solares	6
1.1.2 Los secadores solares en la actualidad	7
1.1.3 Secador solar tipo invernadero del CIES	13
1.1.4 Sistemas de control en secadores solares	15
1.2 Sistemas de supervisión y control	20
1.2.1 Composición estructural de los sistemas de supervisión y control	21
1.2.2 Requisitos de un sistema de supervisión y control	22
1.2.3 Funciones principales de los sistemas de supervisión y control	22
1.2.4 Tipos de sistemas de supervisión y control	23
1.3 Estado del arte de los sistemas de supervisión y control	26
Conclusiones parciales I	28
Capítulo 2. Diseño e implementación del sistema de supervisión y control	29
Introducción	29
2.1 Estructura del sistema de supervisión y control	29
2.1.1 Selección de los dispositivos de campo.	31
2.2 Sistema de adquisición y control.	35
2.2.1 Bloque Microcontrolador.	36
2.2.2 Bloque de sensores.	39
2.2.3 Bloque de actuadores.	55
2.2.4 Bloque de Comunicación	56
2.2.5 Fuente de alimentación.	57
2.2.6 Descripción del <i>firmware</i>	58
2.2.7 Protocolo de comunicación.	61
2.3 Descripción del software para la supervisión del sistema.	64
2.3.1 Ventana principal del software de supervisión.	64
2.3.2 Configuración del puerto de comunicación.	65

2.3.3 Estado del proceso.	66
2.3.4 Histórico del proceso.	68
2.3.5 Referencias y modo de operación.	68
2.3.6 Almacenamiento de las variables del proceso.	70
2.3.7 Emergencia.	71
2.3.8 Alarmas y Fallos	71
ÍNDICE	
2.4 Verificación y validación a nivel de laboratorio.	72
Conclusiones Parciales II.	73
CONCLUSIONES GENERALES	74
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	XI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Disposición de las partes del secador solar	6
Figura 1.2. Secador solar tipo gabinete.	8
Figura 1.3. Secador solar tipo Carpa.	9
Figura 1.4. Secador solar tipo Túnel.	10
Figura 1.5. Secador solar parabólico tipo cenicafé.	10
Figura 1.6. Secador solar de estera con bandejas.	11
Figura 1.7. Secador solar tipo invernadero.	12
Figura 1.8. Secador solar para madera SecSol, Pinar del Río.	12
Figura 1.9. Secador solar tipo invernadero del CIES.	13
Figura 1.10. Diferentes vistas del secador solar tipo invernadero del CIES.	14
Figura 1.11. Secador solar con ventanillas de regulación del aire.	18
Figura 1.12. Secador solar con regulación del aire a través de ventilador.	19
Figura 1.13. Composición estructural del sistema de supervisión y control tipo Monopuesto. ..	24
Figura 1.14. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Servidor/Cliente.	24
Figura 1.15. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Servidor/Multi- Clientes.	25
Figura 1.16. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Múltiples Servidores/Clientes.	25
Figura 2.1. Sistema de supervisión y control.	31
Figura 2.2. Ubicación de los ventiladores y los sensores en el secador solar.	35
Figura 2.3. Diagrama en bloque de la tarjeta de adquisición y control.	36
Figura 2.4. Esquema de conexión del microcontrolador.	37
Figura 2.5. Esquema de los sensores inteligentes SHT75.	39
Figura 2.6. Secuencia de inicio de transmisión.	40
Figura 2.7. Acondicionamiento de los sensores LM35.	43
Figura 2.8. Configuración del OPA27 para eliminar el offset.	49
Figura 2.9. Acondicionamiento para la medición de irradiancia.	52
Figura 2.10. Circuito de acoplamiento de los relés al microcontrolador.	55
Figura 2.11. Esquema de la comunicación RS485.	57
Figura 2.12. Esquema eléctrico de la fuente de alimentación.	58

Figura 2.13. Secuencia de trabajo del firmware en la Tarjeta de adquisición y control.....	61
Figura 2.14. Ventana principal del supervisorio.	65
Figura 2.15. Configuración del puerto de comunicación.	65
Figura 2.16. Ventana para configurar la comunicación RS485.	66
Figura 2.17. Información general del secador solar.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.18. Histórico del proceso.....	68
Figura 2.19. Identificación del especialista.	69
Figura 2.20. Configuración del sistema de control.	69
Figura 2.21. Control manual.	70
Figura 2.22. Guardar variables del proceso.	70
Figura 2.23. Ventana para activar-desactivar parada de emergencia.	71
Figura 2.24. Ejemplo de alerta por fallo.	72
Figura 2.25. Ejemplo de alerta por posible evento inusual.	72
Figura 7.1. Celda Solar.	XVII
Figura 7.2. Foto del circuito de acondicionamiento de la celda solar.	XVII
Figura 10.1. Imagen de la tarjeta de adquisición y control.	XX

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Campo de medición de las variables que intervienen el proceso de secado.....	34
Tabla 2.2. Coeficientes de linealización en la medición de humedad relativa	41
Tabla 2.3. Coeficientes para la conversión de SO_T en T ($^{\circ}C$)	41
Tabla 2.4. Coeficientes para la corrección de SO_{RH} con respecto a la temperatura.....	41
Tabla 2.5. Valores de R , R_1 y R_2 para amplificar la señal del sensor de temperatura LM35	43
Tabla 2.6. Valores de R , y R_G para amplificar la señal del sensor de irradiancia	52
Tabla 2.7. Códigos enviados desde la PC.....	61
Tabla 2.8. Códigos de configuración de los parámetros de control	63
Tabla 4.1. Datos característicos del sensor SHT75.	XIV
Tabla 4.2. Comandos para el manejo del sensor SHT75.	XIV

Introducción

La energía solar que recibe el planeta Tierra es miles de veces superior a la producida a partir de las fuentes de energías no renovables, como por ejemplo, el carbón, petróleo y los reactivos nucleares. En la actualidad, la misma, como fuente de energía renovable, es de amplio uso en diferentes sectores socioeconómicos (Berriz, 2001).

Existen diferentes vías para el aprovechamiento térmico de la radiación solar, como fuente primaria de energía; entre las que se encuentran los colectores solares, la destilación solar, cocinas eficientes y secadores solares, entre otras. El calentamiento de fluidos y el secado son ejemplos de procesos industriales que demandan grandes cantidades de energía, donde el uso de la energía solar puede ser una alternativa atractiva y que cada día se generaliza más su uso.

El secado es ampliamente utilizado en procesos industriales, así como en la conservación de productos agrícolas, pecuarios y marinos. En Cuba, singular importancia tiene el secado de minerales, madera, tabaco, café, cacao, arroz, forrajes, semillas, plantas aromáticas y medicinales, frutas, pescados, productos cárnicos, entre otros (Berriz, 2001).

Nuestro país, carente de grandes recursos energéticos convencionales, aboga por el empleo racional de los mismos y por el uso, a su vez, de las fuentes renovables de energía. En este sentido, por ejemplo, se han desarrollado diferentes tipos de secadores solares, los cuales reúnen la mayoría de las ventajas de los tipos convencionales, aunque haciendo uso de muy poca energía eléctrica para el calentamiento del aire o el producto en cuestión.

El secado natural, o sea, a la intemperie, bajo el sol o en naves abiertas, no garantiza, en muchos casos, bajar la humedad de los materiales a los niveles requeridos. Es muy difícil, y a veces hasta imposible, lograr con el secado natural la calidad requerida del producto final. Por estas razones es tan usado el secado artificial en equipos llamados secadores.

En todo proceso de secado existe la necesidad de controlar y monitorear una serie de parámetros propios del secador y del proceso de secado en sí, los cuales permiten obtener un producto final de calidad competitiva en el mercado. Ejemplos de tales parámetros son la temperatura, humedad relativa, la irradiancia, dirección y velocidad del viento, el tiempo de secado y la temperatura ambiente.

En el CIES de Santiago de Cuba se realizan estudios sobre el uso de secadores solares como forma alternativa para sustituir el secado tradicional.

INTRODUCCIÓN

En este centro existe un secador solar tipo invernadero, el cual no posee un sistema de supervisión y control que permita obtener un producto de calidad. Esto provoca dificultades en la realización de experimentos que permitan elaborar los programas de secado. De aquí se plantea como **problema de la investigación**: la necesidad de diseñar un sistema de supervisión y control para el secador solar tipo invernadero en el CIES. Para resolver esta problemática se define como **objeto de trabajo** la supervisión y el control del secador solar tipo invernadero en el CIES. El **objetivo** radica en diseñar un sistema de supervisión y control para el secador solar tipo invernadero. Definiendo como **campo de acción** la supervisión y control del secador solar tipo invernadero, utilizando microcontroladores PIC. Además se plantea como **hipótesis** que si se diseña un sistema de supervisión y control para el secador solar tipo invernadero del CIES, a partir de microcontroladores PIC, puede optimizarse el proceso de secado, obteniéndose un producto de mejor calidad.

Las **tareas** para dar cumplimiento al objetivo de la presente investigación se relacionan a continuación:

1. Caracterizar desde el punto de vista gnoseológico e histórico los secadores solares.
2. Definir los aspectos teóricos y el estado del arte, referentes a los sistemas de supervisión y control.
3. Diseñar una tarjeta de adquisición y control basada en microcontroladores PIC para el control del secador solar tipo invernadero del CIES.
4. Desarrollar una aplicación en LabWindows para realizar la supervisión del secador solar tipo invernadero.
5. Analizar los resultados de la investigación.

Técnicas y métodos:

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas empíricas como la observación y entrevistas.
3. Método histórico – lógico.
4. Métodos experimentales: Diseño e implementación.
5. Método de análisis – síntesis.

Significación práctica de la investigación:

La investigación muestra las ventajas de automatizar el secador solar tipo invernadero. La misma aporta una mejora técnica en el aspecto de la supervisión y el control de parámetros, como son la temperatura y humedad relativa, en el secado de distintos productos. Esto permite la optimización del proceso de secado, obteniéndose un producto de mejor calidad. También brinda a los investigadores del CIES la posibilidad de realizar estudios sobre el proceso de secado, debido a que permite el registro continuo de todas las variables presentes en el proceso.

El presente informe del trabajo, se encuentra organizado de la siguiente forma: una introducción general en la que se exponen las principales motivaciones que llevaron a la realización de esta investigación y en la cual se encuentra además, la fundamentación del diseño metodológico de la misma; dos capítulos que constan de introducciones parciales para la mejor comprensión de los objetivos de los mismos. Finalmente en cada capítulo se presentan sus conclusiones, además de las conclusiones generales, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el Capítulo I se presenta el estudio teórico del presente trabajo. Para ello se describen los distintos tipos de secadores solares, abordando sobre el secador solar tipo invernadero existente en el CIES, en cuanto a su diseño y sus principales características. Además se caracterizan los aspectos teóricos y el estado del arte de los sistemas de supervisión y control.

En el Capítulo II se analiza primeramente el diseño de la tarjeta de adquisición y control para el secador solar. Además se describe la programación de la misma y el protocolo desarrollado para la comunicación entre la tarjeta controladora y la PC. Finalmente se muestra el sistema de supervisión desarrollado, empleando el LabWindows CVI 9.

Capítulo 1. Caracterización de los secadores solares y los sistemas de supervisión y control

Introducción

En este capítulo se realiza una caracterización conceptual de los secadores solares, así como una reseña histórica sobre estos y su desarrollo en la actualidad. Se describe el secador solar tipo invernadero del CIES, haciendo referencia a su estado de automatización. Finalmente se caracterizan los aspectos más importantes de los sistemas de supervisión y control.

1.1 Secadores solares

El secado solar no es más que el uso de la radiación solar como fuente de energía para el proceso de secado, que se entiende como la operación de disminuir la humedad a un determinado producto, por medio de la evaporación y eliminación del agua contenida en el mismo, sin alterar su composición química (Berriz, 2001) (Bernardes & Theodor, 2010).

El secado es un método de conservación de productos, lo que inhibe la proliferación de microorganismos y dificulta la putrefacción. El secado de productos mediante el sol y el viento para evitar su deterioro ha sido practicado desde tiempos remotos. El agua suele eliminarse por evaporación (secado al aire, al sol, ahumado o al viento. Las bacterias, levaduras y hongos necesitan agua en el alimento para crecer. El secado les impide efectivamente sobrevivir en él.

El hombre prehistórico consumió alimentos en estado natural, con el transcurso del tiempo, comenzó a almacenar los mismos, surgiendo así procedimientos como la conservación a través de las fermentaciones naturales, la reducción de la actividad acuosa por el agregado de azúcar y sal, y la práctica del secado al sol. La misma es muy antigua, los primeros trabajos, fundamentalmente de carácter práctico, se reportan desde 1940.

El desarrollo teórico y experimental del tema se observa a partir de 1960, cuando en varias universidades se realizaron importantes experimentos para disminuir la cantidad de agua en productos como semillas y madera; además, se aprecia el avance en el diseño de los secadores, buscando disminuir el tiempo de secado.

Los secadores solares pueden tener disímiles formas, y están compuestos por materiales transparentes como polietileno, vidrio y superficies ennegrecidas para absorber la radiación solar, para diseñarlos se han empleado métodos analíticos

y numéricos, los cuales utilizan metodologías complejas y extensas que deben ser utilizadas por personal de alta calificación. La simplicidad de los métodos gráficos le proporciona dinamismo y carácter práctico, aún en la era de la computación y de la electrónica (C. Oliveros, 2002).

Hoy en día los secadores solares han adquirido una gran importancia en el tratamiento de productos para acelerar la germinación, en la termoterapia de diferentes cultivos, para eliminar las plagas y los virus, así como para la deshidratación de los excedentes de las cosechas y la obtención de productos de primera necesidad, a bajo costo, como son los medicamentos a partir de las plantas medicinales secas (Castañeda & Meza, 2008).

En la actualidad existen dos métodos tradicionales para llevar a cabo el proceso de secado, tales como (Berriz, 2001) (Berriz, 2012).

1. Secado natural

Se conoce por secado natural a la pérdida de humedad de los productos o materiales en condiciones ambientales, estén expuestos o no a la radiación solar directa. El producto es disperso en terrenos cementados o de ladrillos. Este procedimiento es de muy bajo costo, además puede producir fuertes mermas ocasionadas por las lluvias y el ataque de insectos y animales. Por otro lado, la calidad del producto se ve afectada por la contaminación, como por ejemplo de polvos e insectos (Berriz, 2001) (Berriz, 2012).

2. Secado artificial

Se llama secado artificial a la pérdida controlada de humedad de los productos o materiales con el uso de equipos o dispositivos especiales como los secadores solares, en los cuales el aire puede ser calentado aún con gas de la combustión de leña, de la quema de combustibles fósiles o por electricidad (Berriz, 2001) (Berriz, 2012).

Por diferentes causas, el secado artificial ha sustituido, en muchos casos, al natural, y la misma se desarrolla cada día más, tanto en nuestro país, como en el resto del mundo.

El secado artificial frente al natural posee algunas ventajas, tales como:

- Las temperaturas son más elevadas y, en consecuencia, los grados de humedad son menores. Esto trae como resultado un secado más rápido y una menor humedad final.

- Las temperaturas elevadas que se generan actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de moho.
- El producto dentro del secador solar está protegido del polvo y los insectos.
- El ritmo de secado es más acelerado.
- Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria mano de obra adicional para recoger el material como (Berriz, 2001) (Berriz, 2012) (UNIFEM, 1998).

1.1.1 Clasificación de los secadores solares

Un secador solar consta básicamente de dos elementos (Ver figura 1.1):

- 1- El colector, donde la radiación calienta el aire.
- 2- La cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire caliente que pasa a través de ella, impulsado por ventiladores de recirculación.

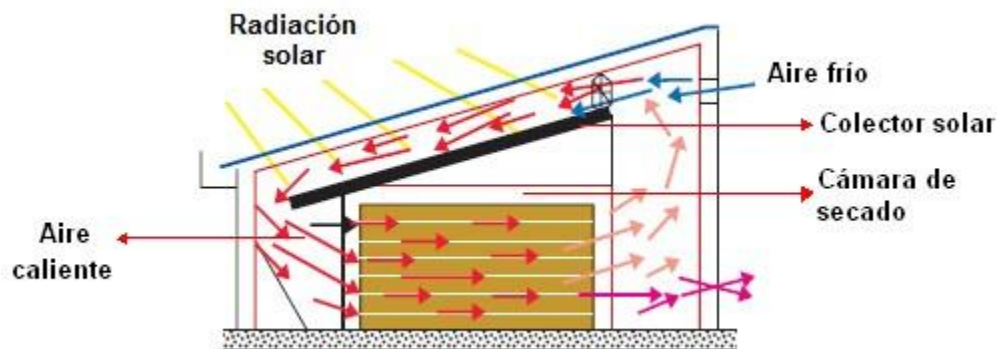


Figura 1.1. Disposición de las partes del secador solar

La disposición de estas partes determina la forma de calentamiento solar, clasificándose en (Fuller, 2009)(Berriz, 2012).

- *Secador solar indirecto*

Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. Este es esencialmente un secador convectivo convencional, donde el sol actúa como principal fuente energética. El tener una cámara de secado separada del colector, facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga, además de permitir procesar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder calidad de aspecto por una exposición directa al sol. □ *Secador solar directo*

Los dos elementos pueden unirse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. En estos la radiación es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo

el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua (Fuller, 2009)(Berriz, 2012).

- *Secador solar mixto*

Es el caso en que se combinan el secado indirecto y el directo (Fuller, 2009) (Berriz, 2012).

1.1.2 Los secadores solares en la actualidad

En la actualidad existen muchos modelos de secadores solares, diseñados para diferentes productos a secar, en latitudes e intensidades de radiación también diferentes; contruidos con plásticos, vidrios, metales, madera, o cualquier otro tipo de material; diseñados para una operación manual, mecanizada, o con controles automáticos e inclusive con fuentes adicionales de energía para suministro de calor o para el movimiento de aire. Pero todos, independientemente del tipo o modelo, pueden significar un ahorro considerable de energía convencional. A continuación se describen algunos de estos secadores:

- *Secador solar tipo gabinete*

Es un modelo para secar alimentos, especialmente aquellos que necesitan mantener un buen color y proteger sus propiedades naturales.

Consiste en una cámara de secado y un colector solar inclinado, unidos entre sí en la parte inferior de la cámara. En ésta se encuentran superpuestas varias bandejas de secado, (ver figura 1.2).

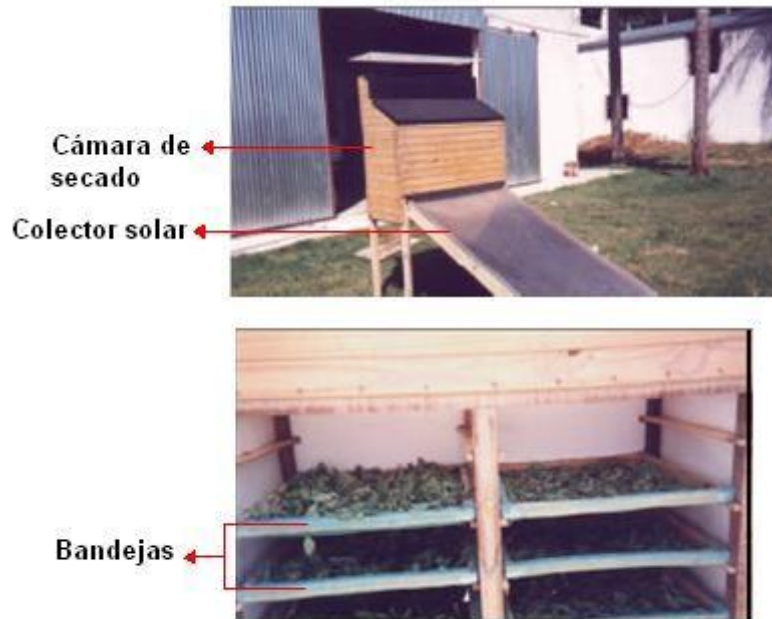


Figura 1.2. Secador solar tipo gabinete.

El colector está cubierto con vidrio y tiene en su interior una chapa de color negro doblada en zigzag, para aumentar su superficie de intercambio de calor con el aire. El aire ambiental entra por la extremidad inferior del colector, que está cubierta por una malla mosquitero, y se calienta gradualmente. Finalmente, el aire caliente entra en la cámara, donde atraviesa las bandejas ejerciendo su poder secador. Un extractor eléctrico de aire en la parte superior de la cámara garantiza la buena ventilación del aparato (Bergues, 1994) (Jankowski, 2006).

- *Secador solar tipo Carpa*

Es un modelo sencillo, compacto, liviano, plegable y transportable para secar alimentos en pequeñas cantidades. La figura 1.3 muestra que este secador está hecho de una estructura metálica (que puede ser también de madera) con forma de una carpa triangular, cubierta en gran parte por una lámina de plástico transparente, resistente a los rayos ultravioletas (polietileno larga duración) y puede tener diferentes tamaños.

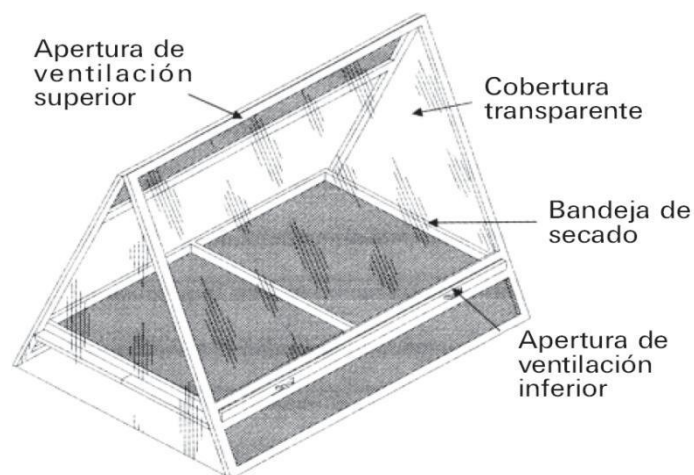


Figura 1.3. Secador solar tipo Carpa.

Las aberturas de ventilación están ubicadas abajo, por uno de los lados longitudinales y arriba por el otro, los dos cubiertos de malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos. En la parte inferior se encuentra la bandeja de secado removible, consistiendo en un tejido, por ejemplo de hilo de nylon. Sobre éste se coloca una gasa o una malla fina sobre la cual se colocarán los productos a secar (Bergues, 1994.).

- *Secador solar tipo Túnel*

Este modelo sirve para pequeños emprendimientos industriales. En la figura 1.4 se observa que este secador consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro y una cobertura transparente de lámina de polietileno de larga duración. El túnel está dividido en sectores alternantes de colector y secador. Los primeros tienen la función de calentar el aire, que luego en los últimos es utilizado para el secado de los productos en las bandejas.

El aire circula en forma horizontal a través de todo el túnel, generalmente con la ayuda de un ventilador eléctrico. En sitios sin energía eléctrica está apoyado por una chimenea ubicada en la salida del secadero. Las bandejas de secado son removibles. Por la altura relativamente grande de las bandejas es posible secar también productos que ocupan mucho volumen, tales como hierbas o flores. La entrada y la salida del aire están protegidas con una malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos.

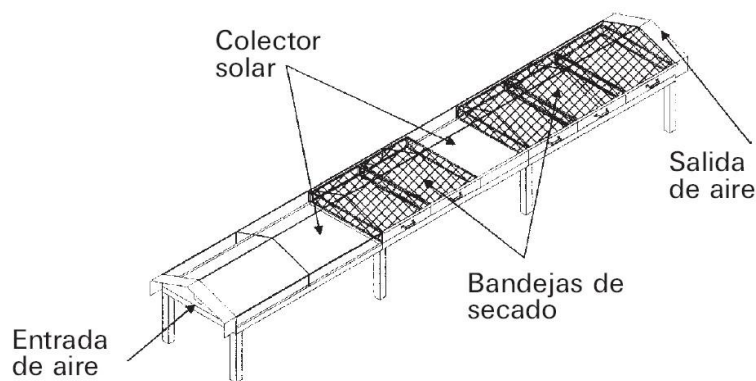


Figura 1.4. Secador solar tipo Túnel.

Para un mejor aprovechamiento del secador, se puede agregar un sistema de calefacción auxiliar (Bergues, 1994.).

- *Secador solar parabólico tipo Cenicafé*

Los secadores solares con cubierta plástica, denominados parabólicos, han tenido gran aceptación por los pequeños productores para secar la totalidad del café de la finca, y por aquellos de mediana y alta producción, para secar los granos, las pasillas y el café. El secador parabólico tipo Cenicafé consta de una estructura de forma parabólica construida en guadua, en la cual el plástico cubre el piso de secado y deja aberturas laterales, lo cual facilita la correcta circulación del aire (ver figura 1.5) (C. Oliveros, 2002) (Cesar & Berriz, 2010).



Figura

1.5. Secador solar parabólico tipo cenicafé.

Entre las características que más han favorecido su rápida adopción están su bajo costo y sus facilidades de construcción y operación.

- *Secador solar de estera con bandejas*

El secador de estera no tiene el objetivo de crear un proceso continuo, sino de facilitar su carga y descarga. Este secador está compuesto de una estructura, de angulares metálicos con un fondo aislante y una cubierta transparente de dos láminas de vidrio. En los extremos inferior y superior de la estructura van

colocadas las ruedas (sprocket) para cadenas, o para esteras continuas (ver figura 1.6).

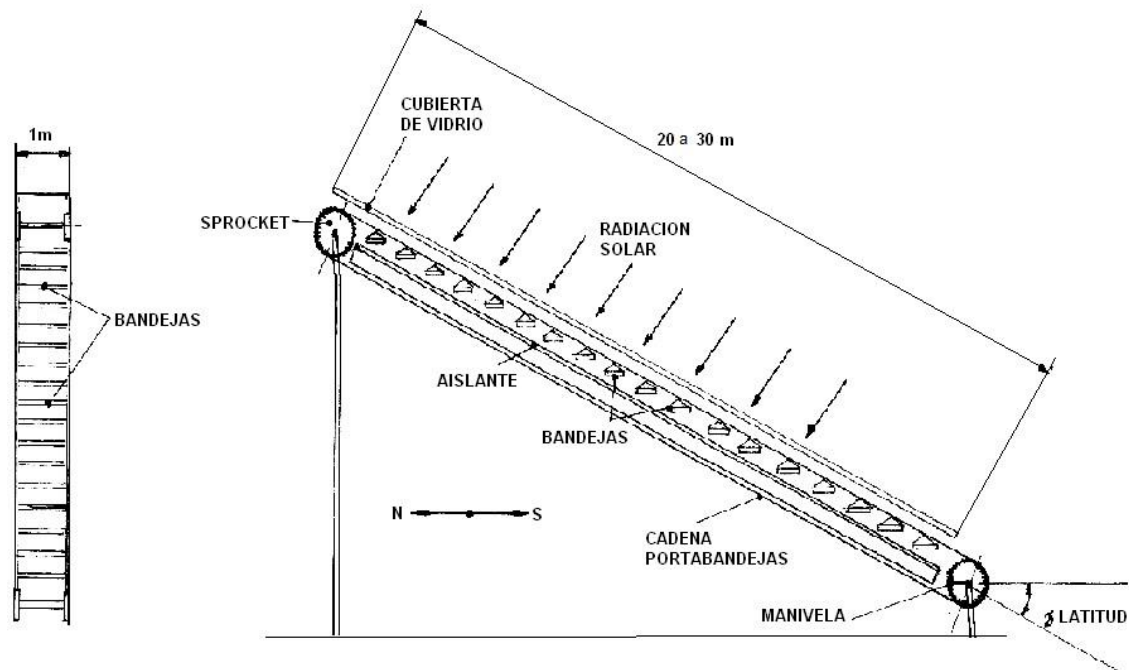


Figura 1.6. Secador solar de estera con bandejas.

En este tipo de secador se usan bandejas y no esteras continuas, éstas son desmontables para ayudar la carga y descarga del material. Su orientación es Norte - Sur. Generalmente, la instalación consta de varios módulos de 20 a 30 m² de área de captación de la radiación solar, colocados uno al lado del otro.

- *Secador de bandejas tipo invernadero*

El secador solar de bandejas tipo invernadero es muy usado en nuestros días, en este, el producto recibe directamente la radiación solar (ver figura 1.7). El mismo está formado por una estructura de angulares metálicos o de madera. El fondo del secador va agujereado uniformemente para permitir el paso del aire. La parte superior de éste va cubierta de una o dos láminas de vidrio, las cuales dejan pasar la radiación solar, provocando con esto el efecto invernadero. La cubierta tiene que estar totalmente hermetizada para evitar pérdidas e impedir el paso del agua de lluvia.

El tamaño de las bandejas debe de permitir la carga y descarga del secador de una forma cómoda. A ambas caras del secador se encuentran las ventanillas para la salida del aire húmedo; éstas son generalmente regulables, con lo que se puede, hasta un cierto límite, controlar el proceso de secado. Este secador se coloca con su eje longitudinal en dirección Norte-Sur, para lograr una mayor eficiencia debido al recorrido del sol.

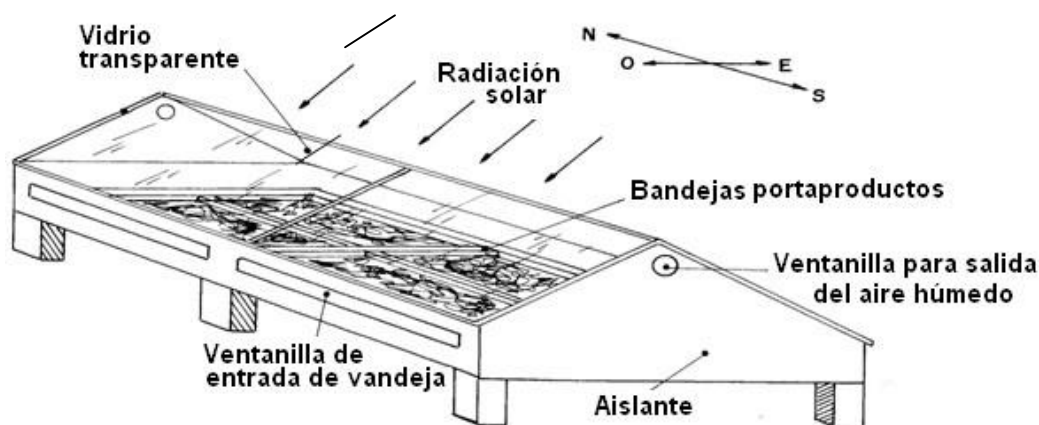


Figura 1.7. Secador solar tipo invernadero.

En Colombia, Argentina, Brasil y otros países de América Latina, se utilizan secadores solares, principalmente, en el sector cafetalero y el cultivo de plantas para condimentos como el ají, plantas medicinales como orégano, y materiales como madera (Isermann, 2006) (Cesar & Berriz, 2010).

En Cuba, a partir de estas experiencias se han desarrollado varias decenas de secadores solares de distintas capacidades y características, correspondiendo con las aplicaciones a las que se han destinado, como el secado de maderas, plantas medicinales y semillas. Entre los centros que usan esta tecnología se destacan el Centro de Investigación de Energía Solar (CIES), de Santiago de Cuba, el Grupo Solar del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) en La Habana, y más recientemente el Grupo de Energía Solar de CUBAENERGÍA, ejemplo de ello es el Secador solar para madera SecSol en el aserrío Mil Cumbres, de la Empresa Nacional de Flora y Fauna, en Pinar del Río, el cual se muestra en la *figura 1.8*. El mismo es un producto comercial con alto rendimiento productivo y sin consumo directo de combustible, que garantiza un secado uniforme de una amplia gama de productos, madera, flores, semillas, etc. (Cesar & Berriz, 2010).



Figura 1.8. Secador solar para madera SecSol, Pinar del Río.

1.1.3 Secador solar tipo invernadero del CIES

Este secador es, en esencia, una nave o casa de vidrio tipo invernadero orientado, en su eje longitudinal, de norte a sur. Dentro posee un túnel o cámara metálica ennegrecida con capacidad de 12 m^3 , que capta la radiación solar y la convierte en calor. El mismo clasifica como secador solar indirecto, ya que la cámara de secado y el colector están separados, lo que permite que el producto no pierda calidad de aspecto por una exposición directa al sol. A su vez cuenta con un intercambiador de calor de placa aire-aire que posee dos ventiladores, uno para extraer el aire húmedo y caliente del interior del secador y otro para insertarle aire del ambiente calentado en el proceso de intercambio (ver figura 1.9) (Berriz, 1992).

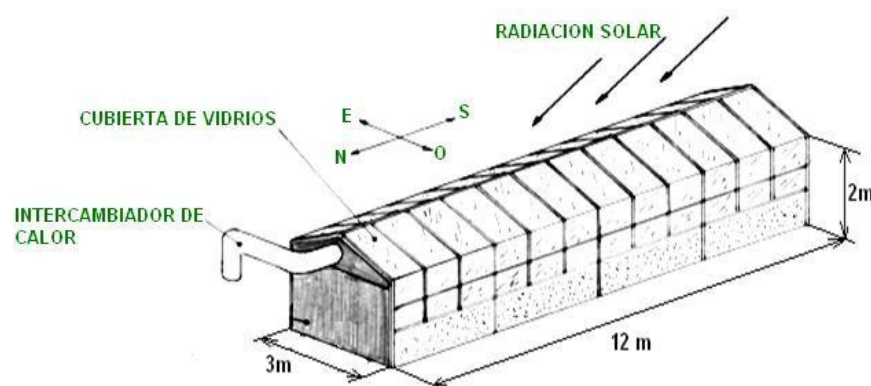


Figura 1.9. Secador solar tipo invernadero del CIES.

La cámara de secado absorbe la energía solar sin la necesidad de calentadores de aire independientes, lo que hace que este tipo de instalación sea más sencilla y económica.

En su parte exterior las paredes laterales son de bloques hasta una altura de 0,7 m y el resto de una doble lamina de vidrio, hasta alcanzar la altura de 2 m. La cubierta a dos aguas, también es con doble láminas de vidrios, que se montan en los marcos con juntas de goma que permiten su dilatación, así como la impermeabilización total de la nave. En la figura 1.10 se muestran varias vistas del secador.

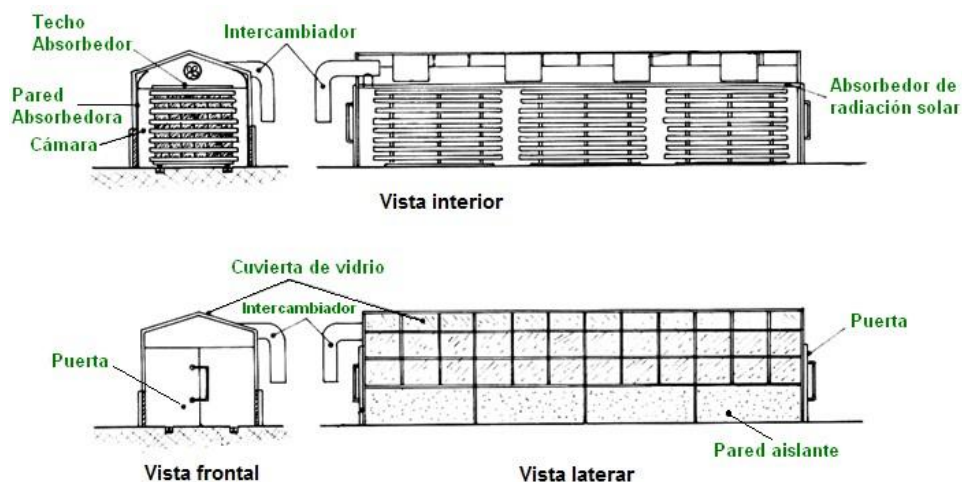


Figura 1.10. Diferentes vistas del secador solar tipo invernadero del CIES.

El secado del material (colocado en bandejas o capas en carros portadores a lo largo de la cámara de secado) se realiza por el paso continuo del aire caliente a través del material, que produce un intenso proceso de intercambio de calor y masa, durante el cual la humedad superficial del material se incorpora al aire por evaporación, en la medida que el aire transfiere su calor.

En sus inicios el secador contaba con ventiladores situados entre la superficie de absorción de la cámara de secado y el techo de vidrio. Donde el aire podía ser movido longitudinal o transversalmente, según convenga, para cada producto en específico. Debido a las altas temperaturas alcanzadas en el lugar donde se encontraban estos ventiladores de recirculación, dejaron de funcionar desde hace más de 8 años. Por ello los investigadores del CIES rediseñaron la instalación. En la actualidad este proceso de recirculación del aire dentro de la cámara, se realiza por medio de cuatro ventiladores centrífugos, situados en los laterales de la cámara de secado (dos en el lateral este y otros dos en el lateral oeste).

La renovación se asegura mediante un intercambiador de calor, compuesto por dos ventiladores centrífugos (uno de extracción y otro de inyección), para que en un tiempo corto sea renovado el aire húmedo y relativamente caliente del interior de la cámara, por aire fresco y húmedo exterior, ahora precalentado en el proceso de intercambio, para nuevamente establecer el proceso que en la práctica es ininterrumpido. Para elevar la eficiencia energética global durante cada ciclo de secado, este recuperador puede reutilizar hasta un 20 % de la energía total del proceso y asegura que el aire entrante se precaliente, bajando rápidamente su humedad relativa, alcanzando parámetros adecuados para participar eficientemente en el proceso de secado.

La difusión continua de la humedad interior del material hacia la superficie por capilaridad, asegura que al final de un ciclo completo la humedad relativa de toda

la masa del material, habrá disminuido de modo homogéneo hasta los valores aceptables para su empleo comercial. El secado quedará completado cuando el producto alcance la baja humedad preestablecida según las exigencias comerciales o de uso (humedad de equilibrio), y que se controla en este caso, por medios indirectos (muestras testigos de material y métodos de laboratorio apropiados).

El secado solar no sigue una curva de disminución continua de humedad, ya que no es posible mantener de modo estable durante las 24 horas del día la temperatura y humedad del aire. Pero en la práctica el proceso de secado no se interrumpe: durante las horas de sol se intensifica el secado superficial por un mayor calentamiento del aire, en tanto durante la noche se intensifica la difusión de la humedad desde el interior del material hacia su superficie. A medida que el material se seca, cede parte de su calor al aire, lo que mantiene su capacidad de absorción de humedad. Ello resulta en que el secado solar de madera, por ejemplo, transcurre en un tiempo entre diez y quince días, un tiempo similar al que se emplea en un secador convencional (Amer & Hossain, 2009).

Este secador solar opera en la actualidad de forma manual, lo que provoca dificultades en la realización de los distintos experimentos; es necesaria la presencia de un operador durante todo el proceso de secado, ya que se realiza sobre apreciación de este.

A su vez la falta de un sistema de control que permita manipular las magnitudes físicas que intervienen en dicho proceso, trae como consecuencia una mayor demora del tiempo de secado y por consiguiente la entrega tardía del producto al cliente.

1.1.4 Sistemas de control en secadores solares

El control de secado de productos en los secaderos que utilizan una fuente de energía convencional (gas-oil, electricidad, etc.) se realiza mediante la regulación del suministro de calor generado a partir de la fuente de energía, de manera que el tiempo de secado puede determinarse fácilmente. Sin embargo, en los secadores solares, al funcionar estos mediante el aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar, que presenta la característica de ser inestable e impredecible, resulta más difícil el control y por tanto, conocer el tiempo de secado. Por todo ello, el control de los secaderos solares ha de realizarse de forma continua en relación con las condiciones ambientales exteriores e interiores de la cámara de secado (Barreiro & Arranz, 2012).

Según (Imre, 1997) en el caso de los secadores solares más simples, el proceso de secado debe ser continuamente controlado. Las principales acciones que

participan en la formulación de una estrategia adecuada para la dirección de la operación son:

- Regulación del caudal de aire.
- Regulación de la recirculación de aire.
- Correcto funcionamiento de la fuente auxiliar de energía (si existe).
- La temperatura del aire de trabajo.
- Flujo de masa.
- Humedad relativa del aire de secado.
- Valores de los límites (Mínimos y Máximos), de ciertos parámetros. ➤ Tasa de secado.

(Fudholi & Sopian, 2010) dicen que la energía necesaria para el secado de los productos agrícolas se puede determinar a partir del contenido de humedad inicial y final de cada producto. Los productos tienen diferentes velocidades de secado y temperaturas máximas admisibles.

Para la evaluación del secadero y su eficiencia, (Augustus, 2002) enumera una serie de variables que son convenientes supervisar. Las más importantes en correspondencia con el prototipo del secador solar del CIES y las variables que se pueden controlar en este, son: temperatura y humedad relativa del aire en la cámara secado.

(Karim & Hawlader, 2005) en su investigación del secado de frutas tropicales, evidencian que las variables de temperatura y velocidad del aire en secadores convectivos, afectan directamente la velocidad de secado. Así, observó que la velocidad de secado se incrementó al aumentar la temperatura del aire de 40°C a 60 °C. Por otra parte, la velocidad de secado se incrementó al aumentar la velocidad del aire de 0,3 m/s a 0,7 m/s a 60°C.

(Prakash & Datta, 2004) dicen que la temperatura tiene un papel importante en la determinación de la calidad del producto seco, obteniendo mejor calidad del producto debido a la lenta velocidad de secado.

(El-Aouar, 2003) en su investigación establece que en el proceso de secado de papaya, la velocidad del aire y la temperatura influyen fuertemente en la velocidad del secado durante la primera fase del proceso. Sin embargo, durante la fase final del proceso, la temperatura es la variable que ejerce más influencia en la velocidad de secado.

(Dissa, 2009), indica que en los primeros días del ciclo de secado se puede generar costra superficial que aumenta la resistencia externa del producto a la transferencia de agua, este efecto indeseable debe evitarse regulando el caudal

y temperatura del aire, y las variables que caracterizan cada proceso de secado en relación al producto.

(Hawladar, 2006) denomina esta dureza como cementación, explica que este fenómeno puede bloquear la transferencia de calor, resultando en una disminución de la tasa de transferencia de humedad; esta resistencia está relacionada con la evaporación del agua en la superficie del producto al inicio del secado.

Las altas temperaturas pueden causar daños irreparables en los productos, si no se controlan adecuadamente los otros parámetros del proceso (Jankowsky, 2006). También las bajas temperaturas pueden causar la destrucción de los productos por la aparición de los hongos que la pudren (Reeb, 1997).

Para el montaje, supervisión y control de un proyecto de secado con energía solar, (Chen, 2005) lista los factores externos a tener en cuenta: radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del aire y humedad relativa; y los factores internos relativos al producto: contenido de humedad inicial y final además del tipo de producto. Es importante tener en cuenta estos factores para poder realizar un seguimiento continuo del proceso con el fin de evaluar su viabilidad y eficiencia.

El control de la humedad relativa no deja de ser menos importante. Valores altos de humedad relativa propios de zonas tropicales dificultan el proceso de secado ya que en esas condiciones el aire es prácticamente incapaz de extraer humedad de los productos (Barreiro & Arranz, 2012).

En todos los secadores se hace imprescindible dejar salir la humedad que se extrae del producto, ya que con el aumento de la humedad relativa del aire, disminuye la velocidad de secado pudiendo llegar a paralizar el proceso, pero más importante todavía, si la temperatura disminuye, puede llegar a sobresaturarse el aire y condensarse la humedad en el producto, lo que puede provocar el crecimiento de hongos y echarlo a perder (Tatiana, 2010).

Estos parámetros fundamentales no pueden ser considerados independientemente uno del otro porque guardan una estrecha relación con la calidad óptima del producto final del proceso de secado.

- Ejemplos de sistemas de control en secadores solares.

En la figura 1.11 se puede apreciar una pequeña cámara de secado, la cual utiliza un ventilador para la recirculación del aire y tiene 4 ventanillas que se pueden regular manualmente para controlar la salida del aire húmedo. Como la cámara es cerrada, este secador lleva dos termómetros, uno de bulbo húmedo y otro de bulbo seco, por medio de los cuales es posible conocer tanto la humedad como la temperatura en el interior. En este secador, el ventilador debe trabajar continuamente mientras tenga el producto y deben abrirse las ventanillas en las horas sin sol para evitar la sobresaturación del aire interior y la consecuente condensación.



Figura 1.11. Secador solar con ventanillas de regulación del aire.

En la figura 1.12 se muestra un prototipo de secador, utilizado para la experimentación e investigación del secado de productos, en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), con una capacidad de 0,3 m³.

El sistema de secado de este equipo se basa en la generación de aire caliente por medio de un colector solar (2), este aire ingresa desde el exterior (1) al colector, en esta zona es calentado por acción de la radiación solar y es impulsado por la acción de un ventilador (3), el cual genera el caudal de aire necesario para que se mueva a través de las bandejas con producto (4); el aire húmedo de la cámara (5) se arrastra hacia la compuerta de salida (6) y es llevado nuevamente al exterior (Tatiana, 2010).

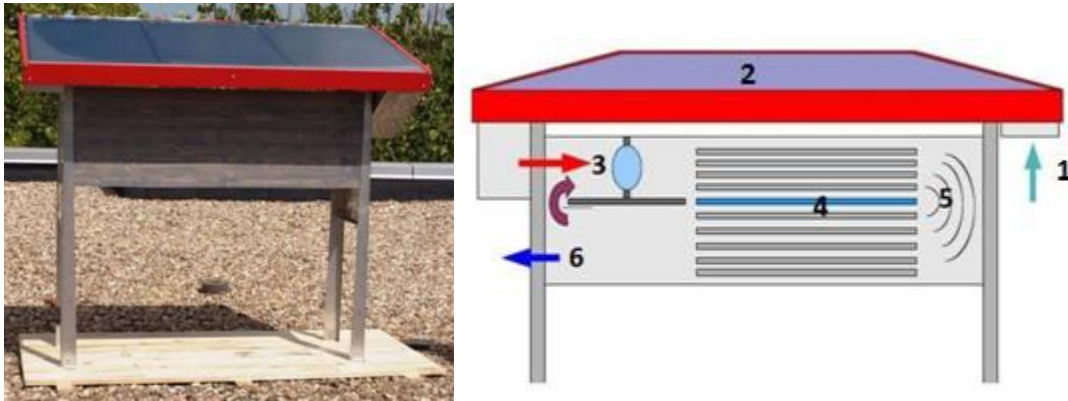


Figura 1.12. Secador solar con regulación del aire a través de ventilador.

Según los experimentos realizados a través del control de temperatura y humedad relativa por medio de un control on-off sobre el ventilador, y la utilización de sensores inteligentes para el monitoreo del secador, se obtienen resultados importantes, tales como:

El apagar el ventilador puede ser útil en momentos de bajas temperaturas (noche) o donde el aire entrante se encuentre con una humedad alta. Esto demuestra que en los momentos de mayor radiación solar es imprescindible que el ventilador permanezca encendido, para que haya un aprovechamiento máximo del aire calentado en el colector.

Si se fijan dos temperaturas de consigna, alta y baja y se ubica un sensor inteligente de humedad relativa y temperatura en la entrada de la cámara, o sea, delante del ventilador, se puede ordenar al ventilador y modificar su velocidad así:

- La velocidad del ventilador debe ser la máxima, cuando el sensor sea igual o mayor que la temperatura de consigna alta.
- La velocidad del ventilador debe ser media, cuando el sensor detecte temperaturas menores de la consigna alta y mayores de la consigna baja.
- La velocidad del ventilador debe ser nula en el momento que el sensor detecte que las temperaturas son iguales o menores que la temperatura de consigna baja.

Investigaciones recientes muestran el uso de secadores solares híbridos (Abakarova & García, 2012) y (Reyes & Vásquez, 2014), a través de la utilización de acumuladores de energía, los cuales almacenan la energía sobrante del proceso, para luego ser utilizada en ausencia de radiación solar. El control de estos secadores solares híbridos, es a través de lógica fuzzy, permitiendo obtener niveles de eficiencia del proceso de secado, tan altos como los secadores convencionales.

Toda esta revisión bibliográfica, además del criterio de los investigadores del CIES, permite elaborar el sistema de control que puede ser implementado en el secador solar tipo invernadero del CIES. Para ello se estudian las características de construcción del secador, así como los equipos de acción final existentes. Dando como resultado que se puede controlar la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara de secado, al extraer el aire húmedo por medio del intercambiador de calor. Para la homogenización del aire dentro de la cámara de secado se utilizan los cuatro ventiladores de los laterales. Haciéndolos funcionar mientras haya radiación solar suficiente para el incremento de la temperatura de la cámara. En las noches estos ventiladores deben ser desconectados para evitar la sobresaturación del aire y la consecuente condensación de la humedad en el producto.

- Medición de la humedad final del producto.

Para determinar el contenido de humedad final del producto a secar, o saber si ha terminado el proceso de secado de un producto en cuestión, existen varios métodos (Barreiro & Cristina, 2012), entre los que cabe destacar, el método del carburo de calcio, el método de medida de la resistencia eléctrica, el método capacitivo, entre otros. Todos estos métodos de medidas son costosos y difíciles de implementar.

Sin embargo un método tradicional y muy utilizado en secaderos de distintos tipos, es el método gravimétrico. El cual consiste en la obtención de una muestra del material, la cual es pesada al inicio del proceso, repitiendo esto por un período de tiempo, no menor a 24 horas, hasta que se consiga un peso constante, o a través de la comparación con tablas gravimétricas para cada producto en específico. La diferencia de peso se usa para calcular el contenido original de humedad de acuerdo a la ecuación 1.1.

$$\% \text{ de humedad inicial} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

En el CIES, la vía que siempre se ha utilizado para conocer la culminación del proceso de secado es a través del método gravimétrico.

1.2 Sistemas de supervisión y control

Los sistemas de supervisión y control están destinados al monitoreo y control de procesos industriales a distancia, de forma remota y computarizada. Su principal función es la centralización del control de procesos fuera del área de control o fuera de la máquina a controlar. En estos sistemas actúan tanto las personas como las máquinas. En este ámbito existen dos tipos de sistemas de supervisión y control, la supervisión activa o control manual, donde el hombre a través de un

software controla los procesos en mayor o menor grado que se estén realizando, también está la supervisión pasiva automática, es decir, la PC a través de una aplicación de software controla las variables del sistema y solo avisa a la persona cuando encuentra un error (Colomer & Melendez, 2010).

Un sistema de supervisión y control incluye un hardware para señales de entrada y salida, actuadores, interfaz hombre-máquina (*HMI*), redes, comunicaciones, base de datos y software. En este tipo de sistemas usualmente existe un ordenador, que efectúa tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamiento de datos y control de procesos. La comunicación se realiza mediante buses especiales o con redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de la planta la posibilidad de supervisar y controlar los procesos que desee.

Entre las principales funciones de los sistemas de supervisión y control se encuentran la supervisión remota, que permite conocer el estado de las instalaciones y coordinar eficientemente las labores de producción y mantenimiento en el campo. Mediante el control remoto de instalaciones se activan o desactivan equipos remotos de manera automática o a solicitud del operador. Igualmente es posible realizar ajustes de parámetros en lazos de control analógicos (punto de consigna). Otra de las funciones más utilizadas es la presentación de alarmas, mediante la cual se alerta al operador sobre la ocurrencia de condiciones anormales o eventos que pudieran requerir su intervención. Normalmente, la criticidad del evento o alarma se indica mediante el uso de colores y/o señales auditivas. Las alarmas se registran para análisis posteriores (Chacon, 2001).

1.2.1 Composición estructural de los sistemas de supervisión y control

Los componentes físicos de un sistema supervisorio pueden ser resumidos de forma simplificada en: sensores, actuadores, redes de comunicación, estaciones remotas (Adquisición/Control) y estaciones de monitoreo (Ranieri, 2007).

- ✓ Los sensores son dispositivos que convierten magnitudes físicas tales como velocidad, fuerza, temperatura, en señales analógicas, posibles a ser leídas por la estación remota.
- ✓ Los actuadores son dispositivos que intervienen sobre el sistema, para ejecutar una determinada acción de control, como por ejemplo conectar o desconectar una maquina o equipamiento.

- ✓ Un proceso de adquisición de datos se inicia en las estaciones remotas, que hacen la colecta de los datos y posterior envío de estos por medio de su red de comunicación y estación de monitoreo.
- ✓ Existen varios tipos de redes de comunicación, que pueden ser utilizadas en comunicaciones entre estaciones remotas y de monitoreo, tales como cables ethernet, fibras ópticas, RS-485, líneas dial-up, radio-módems, etc.
- ✓ Las estaciones de monitoreo son las unidades responsables de coleccionar las informaciones generadas por las estaciones remotas y actuar en conformidad con los eventos detectados, pudiendo ser centralizadas en un único computador o distribuidas a través de una red de computadoras.

1.2.2 Requisitos de un sistema de supervisión y control

Un sistema de supervisión y control debe cumplir varios objetivos para que su instalación sea perfectamente aprovechada:

- Deben ser sistemas de arquitectura abierta, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben permitir la adquisición de datos de todo equipo, así como la comunicación a nivel interno y externo (redes locales y de gestión)
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y fáciles de utilizar, con interfaces gráficas que muestren un esquema básico y real del proceso.

Un software para la supervisión y control debe ser capaz de ofrecer al sistema:

- ✓ Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- ✓ Generación de datos históricos de las señales de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- ✓ Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas a los dispositivos de campo, bajo ciertas condiciones.
- ✓ Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

1.2.3 Funciones principales de los sistemas de supervisión y control

Las funciones principales que posee un sistema de supervisión y control pueden ser agrupadas en las siguientes:

- ✓ *Supervisión remota de instalaciones y equipos:* Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la

planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.

- ✓ *Control remoto de instalaciones y equipos*: Mediante el sistema se puede activar o desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvulas, activar interruptores, prender motores, etc.), de manera automática y también manual. Además es posible ajustar parámetros, valores de referencia, algoritmos de control, etc.
- ✓ *Procesamiento de datos*: El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta el sistema, esta información es procesada, analizada, y comparada con datos anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.
- ✓ *Visualización gráfica dinámica*: El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representen el comportamiento del proceso, dándole al operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo.
- ✓ *Generación de reportes*: El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado por el operador.
- ✓ *Representación de señales de alarma*: A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser tanto visuales como sonoras.
- ✓ *Almacenamiento de información histórica*: Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.
- ✓ *Programación de eventos*: Está referido a la posibilidad de programar subprogramas que brinden automáticamente reportes, estadísticas, gráficas de curvas, activación de tareas automáticas, etc. (Gomez J. , 2005).

1.2.4 Tipos de sistemas de supervisión y control

Los sistemas de supervisión y control se pueden separar en cuatro tipos de estructuras, estas son (Gomez J. , 2005).

1- *Sistemas de supervisión y control tipo monopuesto*

En la figura 1.13 se muestra la Composición estructural de un sistema supervisorio de tipo Monopuesto. La característica fundamental de esta estructura es solamente poseer un computador, el cual será el responsable de supervisar y controlar todo el sistema.

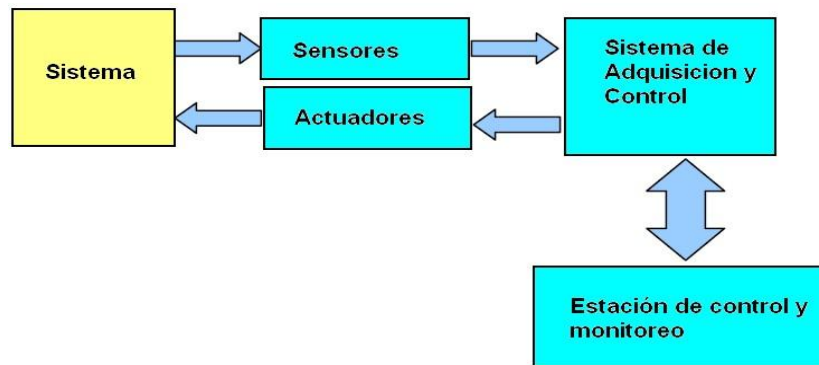


Figura 1.13. Composición estructural del sistema de supervisión y control tipo Monopuesto.

2- Sistema de supervisión y control tipo Servidor/Cliente

En la estructura Servidor/Cliente (figura 1.14) existen dos computadoras, una con la función de proveer servicios (Servidor), y la otra utiliza esos servicios (Cliente). En ese caso, los datos colectados por el servidor son accedidos remotamente por un único cliente conectado en la red, el cual es responsable de su supervisión.

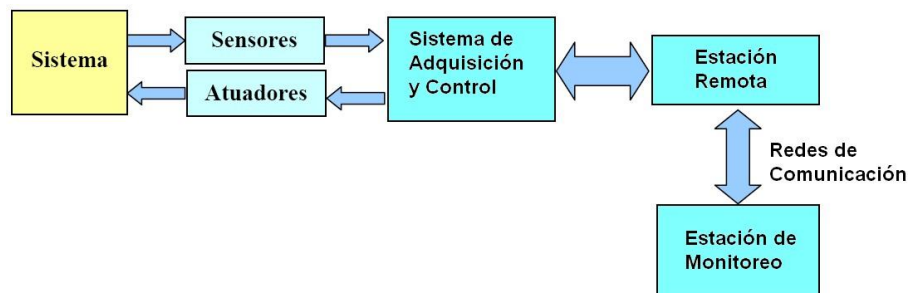


Figura 1.14. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Servidor/Cliente.

3- Sistema de supervisión y control tipo Servidor/Multi-Clientes.

En la estructura Servidor/Multi-Clientes (figura 1.15), hay apenas un servidor de datos, pero a diferencia de la estructura anterior, existen múltiples clientes que se pueden conectar simultáneamente al mismo servidor de datos y realizar su supervisión.

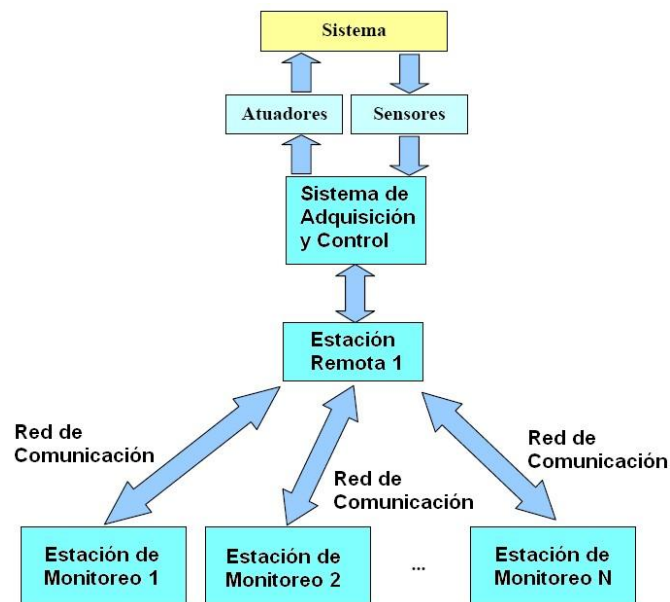


Figura 1.15. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Servidor/MultiClientes.

4- Sistema de supervisión y control tipo Múltiples Servidores/Clientes

En la figura 1.16 se muestra la composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Múltiples Servidores/Clientes. En este caso, al contrario de haber solamente un servidor de datos, múltiples servidores pueden estar disponibles, permitiendo que cada cliente se pueda conectar a más de un servidor al mismo tiempo, proporcionando así, un mayor número de servicios.

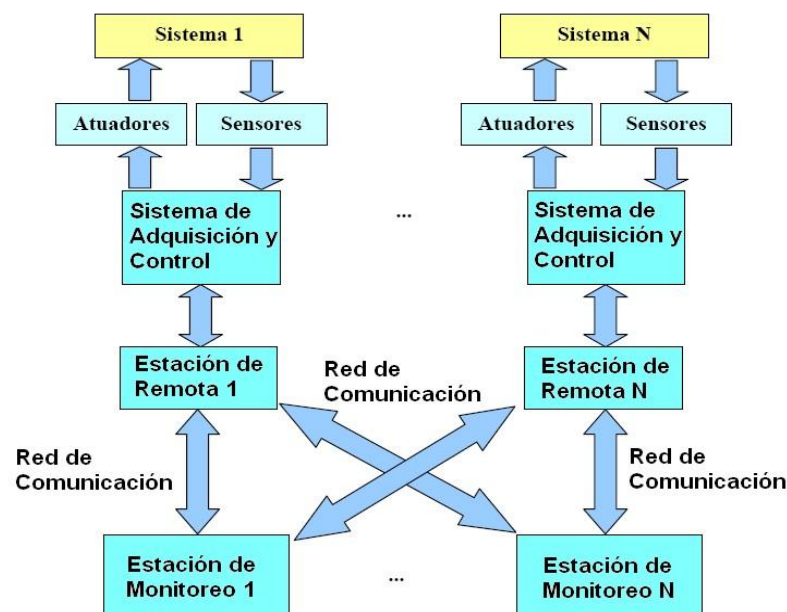


Figura 1.16. Composición estructural de un sistema de supervisión y control tipo Múltiples Servidores/Clientes.

La estructura monopuesto será usada para desarrollar el sistema de supervisión y control, para el caso de estudio, que es el secador solar del CIES, pues en el sistema no hay estación remota y la supervisión y control del secador solar será realizada desde un solo computador.

1.3 Estado del arte de los sistemas de supervisión y control

El constate desarrollo de las tecnologías en función de temas industriales tiene un fuerte componente, definido por la coordinación de las actividades de los diferentes subsistemas, que se integran en las redes de control distribuido industrial que se utilizan actualmente. La coordinación de esas actividades se torna más compleja, por lo que el diseño de sistemas de control industrial incrementa su complejidad evidenciando la necesidad del uso de métodos formales para el modelado de estos sistemas.

El diseño de los sistemas modernos de supervisión y control, está enfocado a la creación de sistemas complejos con gran intercambio entre sus partes y alto grado de soluciones programables, por tanto se requiere realizar la verificación formal del desarrollo de ese software para garantizar cumplir con los objetivos del sistema controlado, con eficiencia y seguridad del funcionamiento. En la actualidad, los sistemas de supervisión y control industrial están siendo integrados con los sistemas de automatización empresarial y elevando el nivel de eficiencia, flexibilidad y seguridad de todas sus funciones. Este desarrollo está siendo acelerado por la necesidad de mantener una alta competitividad de las empresas frente al comercio electrónico globalizado que obliga a las empresas a garantizar los requerimientos de los usuarios de forma rápida y segura (Fernandez, 2011).

Para el diseño de estos sistemas de automatización integrada inteligentes están cada vez más relacionados los métodos de ingeniería de software y de automatización industrial. Dentro de los más utilizados tenemos los métodos de diseño a través del Lenguaje Modelador Unificado (UML) utilizando Redes de Petri (PN). No obstante, muchos de ellos no tienen un gran nivel de aplicación provocado por la alta complejidad, incompatibilidad con las herramientas, tecnologías industriales y poca difusión en las empresas de automatización industrial (Jones, 2004).

En la actualidad algunas de las aplicaciones de los sistemas de supervisión y control son los Sistemas de Manufactura Flexible (FMS), donde la estructura estática es modelada usando diagramas de clase UML y la estructura dinámica es modelada por medio de PN. Dichas redes muy utilizadas en los sistemas de supervisión y control, han resultado una herramienta valiosa para sistemas

concurrentes modeladores, ellas permiten un desarrollo experimentado del software en un ambiente gráfico coherente (Jones, 2004).

En los últimos años en Cuba se han realizado inversiones con alta tecnología de automatización incorporada. Dentro de ello, en específico, los sistemas de supervisión y control tienen un papel importante en el logro de la eficiencia buscada, ejemplo de ello sería (Dominguez, 2013).

1. Sistema de monitoreo y supervisión de la zona 3 (34.5 kV) de la subestación de subtransmisión 110 kV/34.5 kV de Jatibonico.
2. Sistema para la Observabilidad de Redes Eléctricas (SORE), sistema desarrollado por ingenieros del despacho “Lenin” de Santa Clara.

En el turismo, prácticamente todas las nuevas inversiones poseen sistemas de supervisión y control. Se crean edificios inteligentes donde se trabaja en automatizar la climatización, iluminación, uso de elevadores, y otros, según el nivel de ocupación del hotel con vistas al ahorro energético (Dominguez, 2013).

En el MINBAS (Ministerio de Industria Básica) se acomete un plan de modernización de las termoeléctricas, en que juega un papel importante los sistemas de supervisión y control. Las plantas de tratamiento de gas, en la generación de electricidad poseen un alto grado de automatización así como en el proceso de extracción, almacenaje de petróleo y en la industria del níquel, en fábricas de cementos y en centrales azucareros (Dominguez, 2013).

En los parques fotovoltaicos de conexión a red, existentes en distintas partes del país, se cuenta con modernos sistemas de supervisión y control, haciendo uso para la comunicación entre ellos, de cables de fibra óptica y redes GSM (Rivas & Camejo, 2014).

Por otra parte los sistemas de supervisión y control en secadores solares se han generalizado en la actualidad, obteniéndose grandes resultados con respecto a la eficiencia y optimización del proceso de secado, ejemplo de ello lo demuestran recientes investigaciones. Por ejemplo en (Amer & Hossain, 2009) utilizan un secador solar híbrido, con almacenamiento de energía para el secado de banana, el monitoreo se realiza a través de sensores inteligentes y tarjetas de medición de temperatura del tamaño de una tarjeta de crédito, las cuales cuentan con un sistema de comunicación por Radio Frecuencia (RF). Este mismo método de monitoreo es utilizado en la UPM, para el secado de zanahoria (Tatiana, 2010).

En (Barreiro & Arranz, 2012) se implementan tres modelos diferentes para la supervisión y monitoreo de secadores solares. Para ello se utilizan sistemas

electrónicos empotrados en base a sensores inteligentes, para la medición de temperatura y humedad relativa del aire, dentro de la cámara de secado y termopares para la medición de temperatura del producto. El sistema de comunicación de los sensores con el sistema de supervisión, es implementado a través de redes wireless, donde cada sensor es tratado de forma independiente y contiene su propia red de comunicación. Permitiendo estimar los parámetros más importantes en los secadores, así como el tiempo de secado y la humedad del producto en tiempo real.

También en (Abakarova & García, 2012) se utiliza la supervisión y control de un secador solar para productos alimenticios, a través de su implementación con sensores inteligentes de bajo costo. La simulación, control y supervisión del proceso de secado se realiza mediante la utilización del toolbox “Fuzzy” del Matlab y utilizando el compilador Borland C++ para el desarrollo del software de supervisión.

Utilizando la misma herramienta del Matlab, descrita anteriormente, (Reyes & Cubillos, 2014), realizan la supervisión y control de un secador solar híbrido, para el secado de productos agropecuarios. El sistema de monitoreo es a través del programa de adquisición de datos OPTO22 y la comunicación está basada en la tecnología OPC (*OLE for Process Control*).

Conclusiones parciales I

1. El estudio de las características principales de los secadores solares, así como de la estructura del secador solar tipo invernadero del CIES, permite obtener las bases necesarias para el diseño del sistema de supervisión y control.
2. La calidad del secado depende de la temperatura y del tiempo de secado de acuerdo al producto a secar.
3. La humedad relativa del aire en el interior del secador solar dependerá del grado de secado del producto y de la humedad relativa del aire que se introduzca.
4. En el caso de un secador solar como el instalado en el CIES, la temperatura en el interior del secador solar dependerá de la radiación solar, del flujo y la temperatura del aire que se introduzca al secador.
5. La caracterización teórica de los sistemas de supervisión y control, permite conocerlos como la vía para el control de procesos a distancia.

Capítulo 2. Diseño e implementación del sistema de supervisión y control

Introducción

En este capítulo se diseña el hardware necesario para el sistema de supervisión y control del secador solar del CIES. Se detalla cada bloque y luego la programación de la tarjeta de control, así como el protocolo desarrollado para la comunicación con la PC. También se describen las condiciones de control desarrolladas para el secador. Finalmente se realiza el diseño del sistema de supervisión, empleando el LabWindows CVI 9.0.

2.1 Estructura del sistema de supervisión y control

Como se aborda en el capítulo anterior, en todo proceso de secado existe la necesidad de controlar y monitorear una serie de parámetros propios del secador y del proceso de secado en sí, los cuales permiten obtener un producto final de calidad competitiva en el mercado. Ejemplos de tales parámetros son la temperatura, humedad relativa, la irradiancia, dirección y velocidad del viento, el tiempo de secado y la temperatura ambiente.

De acuerdo a las características del secador solar tipo invernadero del CIES, las recomendaciones de los investigadores del laboratorio de termoconversión del propio centro, y las técnicas utilizadas para la supervisión y control de los secaderos solares actuales, se definen las variables que se desean monitorear y controlar en este trabajo.

- *Variables a medir.*
- ✓ La temperatura y humedad relativa del aire interior y exterior del secador solar. Son las magnitudes más importantes a supervisar y controlar en cualquier tipo de secador, ya sea convencional, solar o híbrido.
- ✓ La temperatura del aire en los laterales del secador. Medida entre la cámara de secado y la cubierta de vidrio. Esta medición solo se realiza para saber que lateral del secador está más caliente.
- ✓ La Irradiancia solar. Esta es una medida del flujo de energía solar recibida por unidad de área de forma instantánea. Es necesario su medición, ya que se puede determinar la cantidad total de energía utilizada en un proceso de secado en específico, además de realizar disímiles estudios sobre el comportamiento del secador en correspondencia con la variación de la radiación solar.

- Variables a controlar.

- ✓ La temperatura del aire dentro de la cámara de secado. Debido que las altas y bajas temperaturas pueden causar daños irreparables en los productos, es obligatorio el control de esta variable. El cual es realizado a través de un control on-off, manipulando los motores del intercambiador de calor, para extraer el aire caliente del interior e insertar aire fresco desde el exterior, que será precalentado.
- ✓ La humedad relativa del aire dentro de la cámara. A medida que la humedad relativa del producto disminuya, la del aire aumenta, llegando a un punto en que será necesario renovar este aire para restablecer el gradiente de humedad entre ambas masas y asegurar la continuidad del proceso de secado. Para mantener los valores deseados de humedad relativa, se utiliza un control on-off, manipulando los motores del intercambiador de calor, para extraer el aire húmedo del interior e insertar aire fresco desde el exterior, que será precalentado.
- ✓ Recirculación del aire dentro de la cámara de secado. Para recircular el aire dentro de la cámara de secado, se debe realizar el control de los ventiladores encargados, a una velocidad definida (Tatiana, 2010). Como los ventiladores que existen actualmente en el secador solar están dispuestos en las paredes laterales, no permiten una recirculación óptima del aire, entre la cámara de secado y el colector solar. Estos ventiladores son utilizados solamente para homogenizar la mezcla de aire a través de todo el producto.

- Finalización del proceso de secado.

Debido que los métodos actuales para obtener el contenido de humedad final del producto, son relativamente costosos, en este trabajo se utiliza el método gravimétrico, explicado en el capítulo anterior. Donde la humedad del producto se controla todos los días de secado mediante la pesada de una muestra, situada a diferentes alturas de la cámara de secado. La pérdida de peso, atribuida únicamente a la pérdida de humedad, se generaliza al resto de la carga del secador. Cuando el producto llegue a un peso constante se puede decir que se ha finalizado el proceso de secado. También a través de la comparación del peso del producto con tablas gravimétricas, se puede considerar la finalización del proceso de secado

A partir de la estrategia propuesta, se conforma el sistema de supervisión y control, mostrado en la figura 2.1. El mismo está compuesto por los dispositivos de campo (sensores y actuadores), la tarjeta de adquisición y control, y el sistema de supervisión. Los sensores miden las magnitudes de interés, que debidamente acondicionadas, son llevadas hacia la tarjeta de adquisición, una vez aquí, son

comparadas con los parámetros de control, para hacer actuar a los dispositivos de acción final en correspondencia con las características del proceso. La tarjeta es conectada al sistema de supervisión en la computadora a través del protocolo de comunicación RS-485, para ser mostradas todas las magnitudes de interés y poder llevar un estricto seguimiento del proceso.



Figura 2.1. Sistema de supervisión y control.

2.1.1 Selección de los dispositivos de campo

- Selección de los sensores de temperatura y humedad relativa.

Dentro del campo de las mediciones de temperatura, los instrumentos pueden clasificarse en tres clases principales, basados en: la expansión térmica, el cambio de resistencia y las propiedades termoeléctricas de diversas sustancias como una función de la temperatura. Los termómetros de mercurio y alcohol son ejemplos comunes de sensores de expansión térmica. Sin embargo, su valor es limitado en redes de monitoreo debido a que no tienen la capacidad de registrar datos de manera automática. Por lo que se consideran como alternativas de diseño aquellos sensores basados en la siguiente clasificación:

Termopares: Son sensores para la medición de temperatura, basados en efectos termoeléctricos. Formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz.

Resistivos: Lo constituyen las RTD (*Resistance Temperature Detector*) basadas en la dependencia de la resistencia eléctrica de un conductor con la temperatura. Estas se caracterizan por un coeficiente de resistividad positivo PTC (*Positive Thermal Coefficient*). También lo son las NTC (*Negative Thermal Coefficient*), conocidas como termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo.

Semiconductores: Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente. El uso de procesos de fabricación industriales, permite

CAPÍTULO II

la integración en un chip, del sensor y la parte del proceso electrónico de la señal, también asegura la confiabilidad más alta y una estabilidad a largo plazo excelente.

En el Anexo 2 se muestran las principales ventajas y desventajas de los tipos de sensores mencionados anteriormente, donde se observa que en la utilización de termopares la instalación exige requerimientos especiales para evitar corrientes de inducción de fuentes cercanas de corriente alterna que podrían ocasionar errores en la medición.

A diferencia de los dos primeros tipos de sensores, el de semiconductor ofrece mejores características en cuanto a linealidad y facilidad en el acondicionamiento de señal. Lo que puede considerarse un beneficio para el diseño en cuestión.

La compañía sueca *Sensirion* fabrica diferentes modelos de sensores inteligentes, que pueden medir temperatura y humedad relativa en un mismo encapsulado, de bajo costo (inferior a 20 euros/unidad) y alta fiabilidad (Barreiro & Arranz, 2012). Estos sensores son muy utilizados en la supervisión de secaderos, debido a que el rango de medición de la humedad relativa es de 0 - 100%, mientras que el de temperatura es de - 40 hasta 123.8 (ver anexo 4), adaptándose a las condiciones esperadas en los secadores solares. Teniendo en cuenta que se pueden obtener los valores de temperatura y humedad relativa en un solo sensor, no es necesario seleccionar otro tipo de sensor para la medición de humedad relativa.

Por todo esto se selecciona, para la medición de temperatura y humedad relativa del aire, dentro y fuera de la cámara de secado, cuatro sensores inteligentes del tipo *SHT75*. Cuyas características principales se muestran a continuación:

- Salida digital completamente calibrada.
- Emplean tecnología CMOS garantizando la fiabilidad y buena estabilidad térmica, así como muy bajo consumo de energía.
- Resolución por defecto para la medición de temperatura de 14 bits y de 12 bits para la medición de humedad relativa.
- El máximo error en la medición de temperatura es de ± 1 °C y en el caso de la humedad relativa es de ± 3 %.

Para la medición de temperatura en los laterales del secador solar, pueden ser utilizados cualquier tipo de sensores, debido a que no hay exigencias muy grandes con respecto a la precisión de estas mediciones. Simplemente utilizar

CAPÍTULO II

sensores del mismo tipo. Estos sensores solo serán utilizados por el algoritmo de control, para saber que lateral del secador está más caliente y poder actuar en consecuencia. Por todo esto se seleccionan sensores analógicos de temperatura en base a la unión p-n, del tipo LM35, de bajo costo y buena precisión. Cuyas características principales se muestran a continuación:

- Salida completamente calibrada.
 - Factor de escala lineal de 10mV/°C.
 - Precisión de 0.5 °C a una temperatura de operación de 25 °C.
 - Baja impedancia de salida.
- Selección del sensor de irradiancia solar.

El instrumento que mide la irradiación solar (irradiación global) recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre, se llama Piranómetro PSP (Precision Spectral Pyranometer). El principio de funcionamiento de este instrumento es a través de un termopar, el cual al calentarse producto de la radiación del sol, emite una pequeña fuerza electromotriz.

Otra forma de medir la irradiancia solar es a través de una celda fotovoltaica patrón. La misma trabaja bajo el efecto fotovoltaico, donde la corriente generada en la celda es directamente proporcional a la radiación del sol. Para la conversión y calibración a voltaje, se coloca una resistencia shunt de alta precisión en la salida de la celda. El valor de la misma es ajustado teniendo en cuenta la corriente generada por la celda a una radiación determinada.

Debido a que los piranómetros en general son muy costosos y más usados para la calibración de instrumentos de medición de irradiancia solar y teniendo en cuenta que en el CIES existe una celda patrón, calibrada en el Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica del Instituto de Energías Renovables, de la Universidad Politécnica de Madrid (CIEMAT), se selecciona como sensor de irradiancia solar una celda patrón del fabricante BP Solar, con las siguientes características:

- Sensibilidad de $S_{CBP} = 47\mu V / \frac{W}{m^2}$
- Precisión de $\pm 0.21\%$.

En la revisión bibliográfica se pudo comprobar que ninguno de los autores realiza el cálculo de error para los sensores utilizados en los secadores solares. Tampoco emiten ningún criterio válido para las características que deben tener

los sensores en cuanto a su precisión y tolerancia. Por todo esto, a través de la consulta con varios especialistas en el CIES, con experiencia en el secado de productos, se consideran válidas las mediciones de temperatura, humedad relativa e irradiancia, siempre y cuando las mediciones no sobrepasen de un 5% de error.

La tabla 2.1 muestra el campo de medición de los distintos sensores que son utilizados para la descripción del proceso de secado, donde se detallan los máximos y mínimos de estas variables.

Tabla 2.1 Campo de medición de las variables que intervienen en el proceso de secado.

Variables a medir	Campo de medición
Sensores de temperatura interior	0-90 °C
Sensores de humedad relativa interior	0-100 %
Sensor de temperatura exterior	0-50 °C
Sensor de humedad relativa exterior	0-100 %
Sensores de temperatura en los laterales	2-100 °C
Sensor de irradiancia solar	0-1400 W/m ²

- Ubicación de los sensores en el secador.

Como se abordó anteriormente, para el monitoreo constante del proceso de secado se utilizan cuatro sensores inteligentes del tipo SHT75, de los cuales, tres son ubicados en el interior de la cámara de secado (sensores 1, 2, 3) ver figura 2.2, permitiendo obtener la temperatura y humedad relativa del aire dentro de esta. El otro sensor es ubicado en el exterior del secador, para la medición de la temperatura y humedad relativa ambiente (sensor 6).

Los sensores de temperatura LM35 son ubicados en las paredes laterales del secador, uno en el lateral Este y otro en el lateral Oeste (sensores 4 y 5). Debido a que el sol sale por el Este y se esconde por el Oeste, y el techo del secador es a dos aguas, es necesario saber cual lateral está más caliente, para poder actuar sobre los ventiladores laterales y obtener una masa de aire homogénea en la cámara de secado.

Por último, el sensor de irradiancia es ubicado en el exterior del secador solar (sensor 7). El mismo es montado mirando hacia el Sur y con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal. Lo que garantiza mayor exactitud en la medición de irradiancia solar (Barreiro & Arranz, 2012).

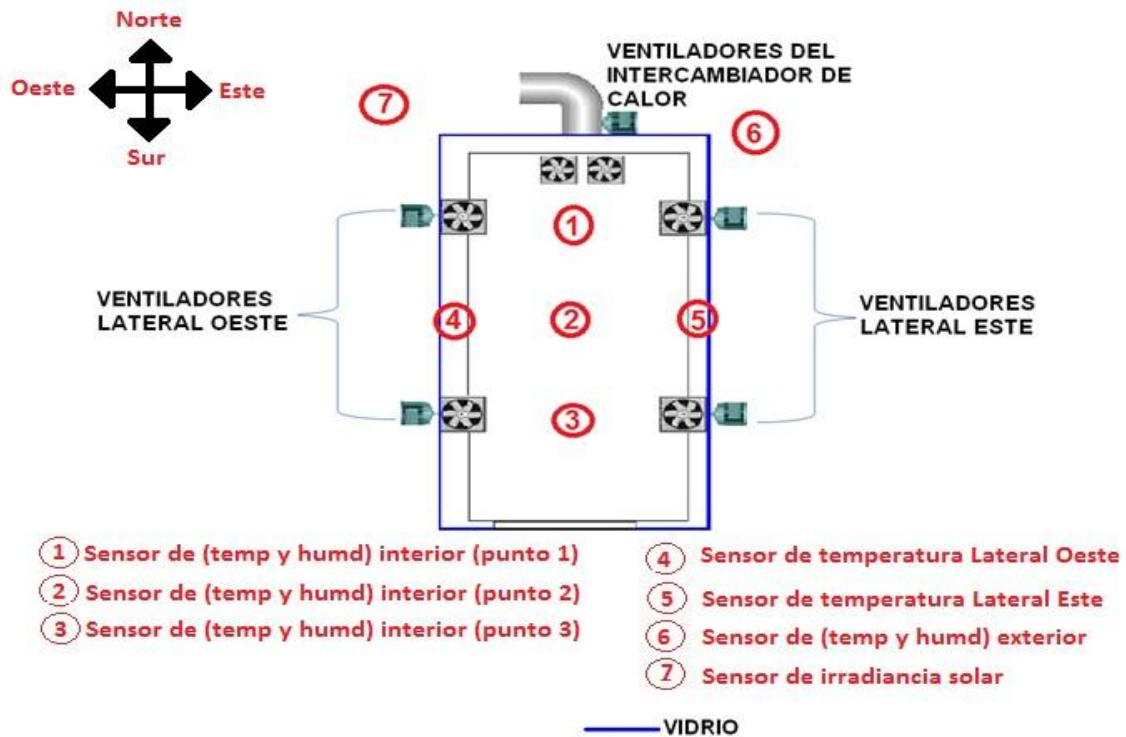


Figura 2.2. Ubicación de los ventiladores y los sensores en el secador solar.

2.2 Sistema de adquisición y control

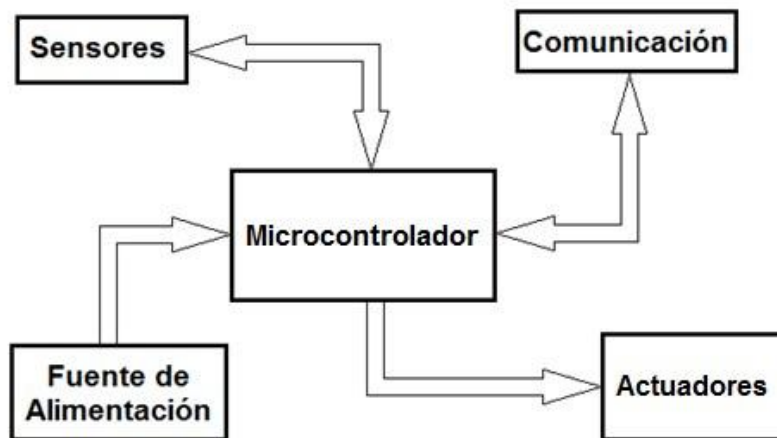
Para dar continuidad al sistema de supervisión y control en desarrollo, se plantea el diseño de una tarjeta de adquisición y control que cumpla las siguientes condiciones:

1. Capacidad para efectuar mediciones empleando sensores inteligentes y analógicos.
2. Posibilidad de procesamiento para el filtrado de las mediciones y ejecución de un algoritmo de control.
3. Capacidad de comunicación con PC.
4. Facilidad de ajuste y configuración por software.
5. Posibilidad de trabajar en tiempo real.
6. Bajo consumo energético y costo de producción.

En la actualidad entre los dispositivos que se emplean en la industria, capaces de cumplir con los requisitos antes expuestos, se encuentran los autómatas programables, pero generalmente son costosos. De aquí la decisión de desarrollar una tarjeta de adquisición y control a partir de un microcontrolador, como elemento fundamental en la placa controladora, que cumpla con los requisitos del diseño.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama en bloque funcional de la tarjeta de adquisición y control, el mismo está formado por varios subsistemas, estos son:

el Microcontrolador, el cual es el cerebro de todo el módulo de medición y control, además se encarga de dar órdenes y controlar los distintos subsistemas, para tomar las diferentes mediciones de los sensores, procesarlas y enviarlas hacia la PC. Las otras partes que componen el sistema se pueden resumir en: bloque de sensores, bloque de actuadores, bloque de comunicación y bloque de la fuente de alimentación. A continuación se describen las características técnicas más importantes de cada uno.



Figura

2.3. Diagrama en bloque de la tarjeta de adquisición y control.

2.2.1 Bloque Microcontrolador

Existen decenas de empresas fabricantes de microcontroladores, entre ellas se pueden mencionar: la compañía Intel, Motorola, Texas Instrument, Microchip, Cypress, Atmel, entre otras. Pero dentro de toda esta gama se destacan dos familias: las de AVR y las de PIC, cuya popularidad es alta entre diseñadores de sistemas embebidos que requieren un rendimiento alto y bajo costo, y eligen uno u otro ya sea por su nivel de integración, por su arquitectura, la disponibilidad de recursos o su lenguaje de programación.

Los PIC son una familia de microcontroladores de 8 bits fabricados por la empresa estadounidense MICROCHIP, cuentan con un CPU RISC y memoria FLASH para el almacenamiento del Firmware. Por otro lado los AVR son una familia de microcontroladores fabricada por la compañía noruega ATMEL, estos microcontroladores de 8 bits cuentan con una CPU RISC y su memoria de programa viene implementada en FLASH. Ambas familias cuentan con periféricos como Puertos Digitales, Convertidor Analógico-Digital (CAD), PWM, entre otros.

Teniendo en cuenta los requerimientos de la aplicación a desarrollar, se decide utilizar el microcontrolador PIC 18LF4620. Debido a que el mismo cumple con todos los requisitos del diseño, además de existir gran cantidad de información

CAPÍTULO II

en la web acerca de su programación en diferentes lenguajes y de la conexión de diferentes periféricos de entrada-salida. También se cuenta con un esquema del programador de estos PICs diseñado por la compañía *Microchip*, el cual se implementa para la grabación del *firmware* del mismo, a través de la utilización de recursos propios (ver anexo 1).

En la figura 2.4 se puede observar que el microcontrolador empleado usa como fuente de reloj un cristal de cuarzo de 4MHz (XTAL1). Para efectuar el reset por hardware de la tarjeta se pulsa el botón de reset (BOT1), esto provoca la aparición de un “0” lógico en el pin (RE3) del micro, permitiendo el reset de la memoria de programa. La fuente de alimentación se conecta a los pines 11 y 32 (5V CD) y 12 y 31 (0V CD) respectivamente. El en anexo 3 se muestran las características principales del microcontrolador.

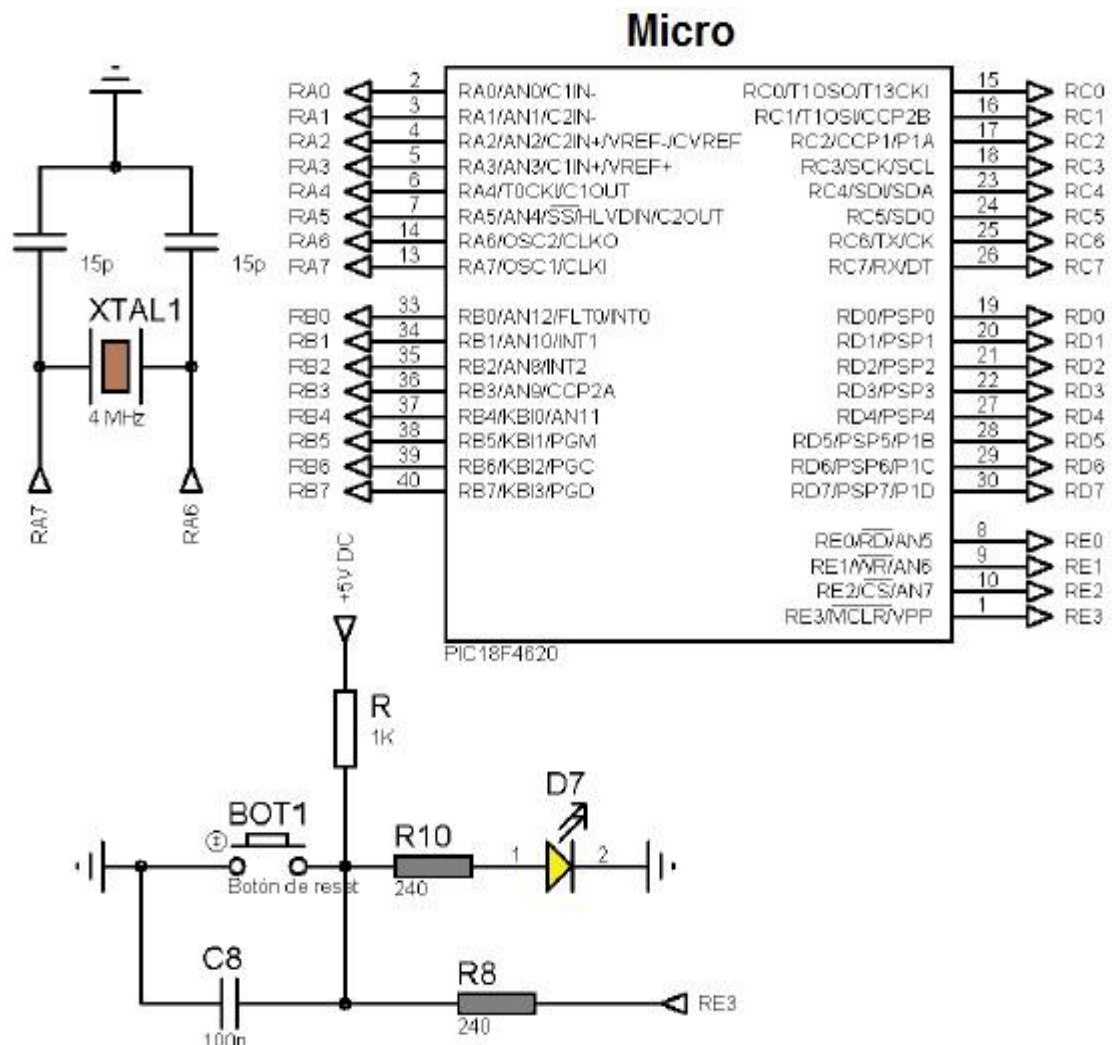


Figura 2.4. Esquema de conexión del microcontrolador.

✓ *Convertidor analógico digital del PIC.*

CAPÍTULO II

El PIC18LF4620 posee un módulo CAD interno que le permite manejar 13 entradas analógicas. El CAD es un convertidor de aproximaciones sucesivas de 10 bits, el cual puede realizar la conversión de las 13 entradas o canales analógicos.

El error absoluto (ΔE_{CAD}) en cada canal analógico, está determinado por la suma de los errores de ganancia, offset, y no linealidad, dentro del margen de temperatura de funcionamiento.

$$\Delta E_{TCAD} = \Delta E_{GAN} + \Delta E_{OFFSET} + \Delta E_{NLI} \quad (2.1)$$

Donde:

ΔE_{GAN} Error de ganancia $\pm 1\text{LSB}$ según el fabricante.

ΔE_{OFFSET} Error de offset $\pm 1.5\text{LSB}$ según el fabricante.

ΔE_{NLI} Error de no linealidad $\pm 1\text{LSB}$ según el fabricante.

Para determinar el LSB se utiliza la siguiente ecuación.

$$LSB = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^D}$$

Donde:

V_{max} Es el voltaje máximo a la entrada del CAD.

V_{min} Es el voltaje mínimo a la entrada del CAD.

D Es la cantidad de bits del CAD.

$$LSB = \frac{(5 - 0)V}{1024} = 4.882mV$$

Como un $LSB = 4.882mV$, sustituyendo en la ecuación 2.1. Se tiene:

$$\Delta E_{CAD} = 4.882mV + 1.5 \cdot 4.882mV + 4.882mV$$

$$\Delta E_{CAD} = 17.08mV$$

Que expresado como error relativo:

$$\delta_{CAD} = \frac{\Delta E_{CAD}}{V_{MAX}} \cdot 100\%$$

$$\delta_{CAD} = \frac{17.08mV}{5V} \cdot 100\%$$

$$\delta_{CAD} = 0.3 \%$$

2.2.2 Bloque de sensores

Este bloque está compuesto por 7 sensores, los cuales tienen la función de caracterizar el proceso de secado. A continuación se detallan cada uno de ellos.

➤ *Sensores inteligentes para la medición de temperatura y humedad*

Los sensores inteligentes SHT75 se conectan al microcontrolador PIC mediante 4 conectores RJ11. Cada uno de estos se conecta por dos terminales, uno de reloj (SCK) común para todos por el pin (RC5) y uno de datos (Data) que es independiente para cada sensor (RD0-RD3), como lo muestra la figura 2.5.

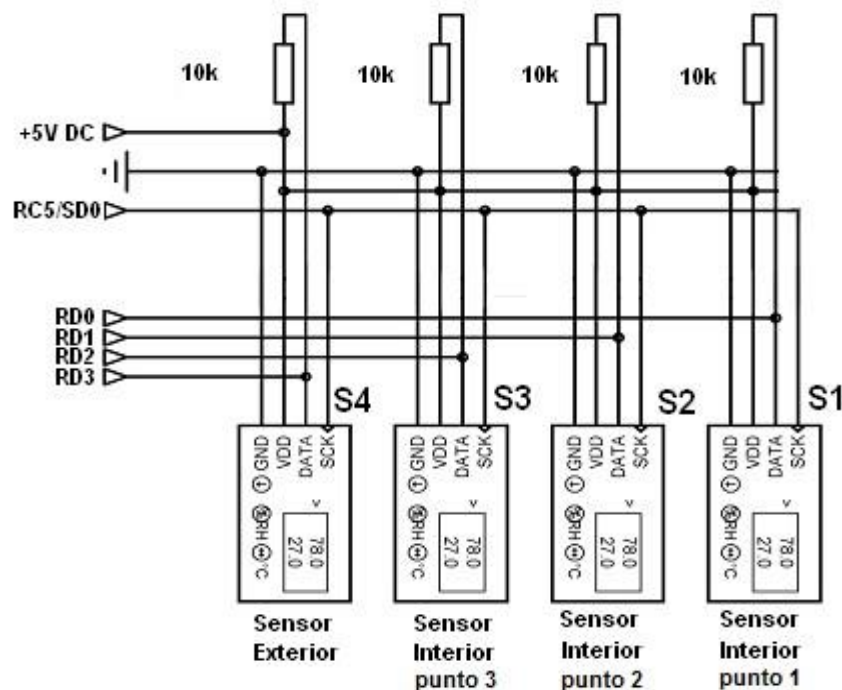


Figura 2.5. Esquema de los sensores inteligentes SHT75.

El pin de reloj (SCK) se emplea para sincronizar la comunicación entre el microcontrolador y el SHT75, para su funcionamiento solo interesa el nivel lógico no existe frecuencia mínima de trabajo.

El pin tri-estado (Data) es bidireccional, se emplea para enviar y recibir datos del SHT75 al microcontrolador, para enviar un dato desde el microcontrolador este

será válido en el flanco de subida del reloj (SCK) y deberá permanecer invariante hasta el flanco de bajada del reloj (ver figura 2.6). Mientras que para realizar la lectura de un dato proveniente del sensor, el dato será válido después del flanco de bajada del pulso de reloj hasta el próximo flanco de bajada.

La cadena continúa con tres bits de direcciones (solo está implementada la dirección 000) y cinco bits de comandos. El sensor *SHT75* indica que ha efectuado la recepción de la orden, poniendo el pin de datos (*Data*) en nivel bajo antes del flanco de bajada del octavo pulso de reloj. Luego libera la línea de datos antes del flanco de bajada del noveno pulso de reloj (Sensirion, 2008).

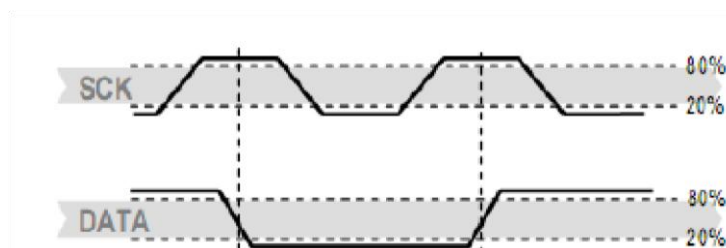


Figura 2.6. Secuencia de inicio de transmisión.

Después de recibir el comando de lectura de temperatura o humedad relativa el microcontrolador debe esperar el tiempo que toma realizar la medición (20/80/320 ms para 8/12/14 bits de conversión). Para indicar que la lectura se ha realizado y que el dato está listo, el sensor *SHT75* pone la línea de datos en nivel bajo, pasando luego al modo Idle (modo de bajo consumo). El dato de la medición es almacenado en el registro de salida del sensor y puede ser leído desde el microcontrolador cuando se estime conveniente.

La lectura de los datos almacenados en el sensor, comienza con un pulso de reloj en alto, el dato leído está compuesto por 2 bytes para cada variable, donde se recibe primeramente los 2 bytes de humedad relativa, comenzando por el MSB y con justificación hacia la derecha. La comunicación se termina después que el LSB de la medición de temperatura se ha recibido en el micro, el cual pone la línea de datos en nivel alto, el *SHT75* automáticamente retorna al modo *SLEEP*.

En esta investigación la medición de temperatura se realiza con 14 bits de resolución en el conversor analógico-digital de cada sensor *SHT75* y la medición de humedad relativa con 12 bits.

Los dos primeros bytes leídos, son guardados en la variable SO_{RH} , para ser convertidos a humedad relativa sin compensación por temperatura mediante la siguiente ecuación:

$$RH_{Lineal} = C_1 + C_2 \cdot SO_{RH} + C_3 \cdot (SO_{RH})^2 \quad (2.2)$$

Donde C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes de linealización como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Coeficientes de linealización en la medición de humedad relativa.

SO_{RH}	C_1 (%)	C_2 (%)	C_3 (%)
12 bits	-2.0468	0.0367	-1.5955e-6
8 bits	-2.0468	0.5872	-4.0845e-4

Por ejemplo, para un valor leído en el primer dato de "0000 1001 0011 0001", la variable $SO_{RH} = 2353$ y aplicando la ecuación 2.2 se obtiene que la humedad relativa sin compensación por temperatura es de 75,79 %.

A su vez, la medición de la temperatura no presenta alinealidades por las características del sensor. Los otros dos bytes leídos, son almacenados en la variable SO_T , para ser convertido a temperatura mediante la siguiente expresión:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (2.3)$$

Donde d_1 y d_2 son los coeficientes de conversión según se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Coeficientes para la conversión de SO_T en T ($^{\circ}C$).

VCC	d_1 ($^{\circ}C$)		SO_T	d_2 ($^{\circ}C$)
5.0 V	- 40.1		14 bits	0.01
4.0 V	- 39.8		12 bits	0.04
3.5 V	- 39.7			
3.0 V	- 39.6			
2.5 V	- 39.4			

Para mediciones de humedad relativa a temperaturas lejanas a $25^{\circ}C$ es necesario compensar la medición (Sensirion, 2008), para ello se realiza el cálculo de la humedad relativa corregida (RH_{real}) mediante la siguiente ecuación:

$$RH_{real} = (T - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{lineal} \quad (2.4)$$

Donde:

t_1 y t_2 son los coeficientes para compensar el error por temperatura de la medición de humedad (ver tabla 2.4).

T Es la temperatura medida con el propio sensor.

Tabla 2.4. Coeficientes para la corrección de SO_{RH} con respecto a la temperatura.

SO_{RH}	t_1	t_2
12 bits	0.01	0.00008
8 bits	0.01	0.00128

Sensores para la medición de temperatura en los laterales

Debido a que la máxima temperatura que podemos registrar en los laterales del secador es de 100 °C, y que la sensibilidad del sensor LM35 es de 10mV/°C, el máximo voltaje a su salida será de 1000mV, el mínimo voltaje que puede tener es de 20 mV, que corresponde a 2 °C, de acuerdo a la configuración del hardware del sensor, usada en el diseño (LM35, 2000).

Para acondicionar la salida de los sensores, se utiliza el circuito mostrado en la figura 2.7, para ello se utiliza el Circuito Integrado (CI) OPA27, en su configuración como amplificador no inversor, teniendo en cuenta que el esquema diseñado puede trabajar en el campo de 2 °C a 100 °C. Para la conversión analógica-digital de estas señales se utilizan los puertos (AN0) y (AN1) del PIC.

De acuerdo a las recomendaciones del fabricante es necesario poner a la entrada del circuito amplificador un filtro RC, formado por una resistencia R=75Ω y un condensador C = 1μF, para evitar las fluctuaciones a la salida del sensor, este se pone siempre que la distancia entre el sensor y el circuito amplificador supere los 10 cm como es el caso del presente trabajo. Del circuito de acondicionamiento hacia la tarjeta de adquisición se utiliza cable blindado. Las características principales de los sensores y el circuito amplificador se detallan en el anexo 5 y anexo 6, respectivamente.

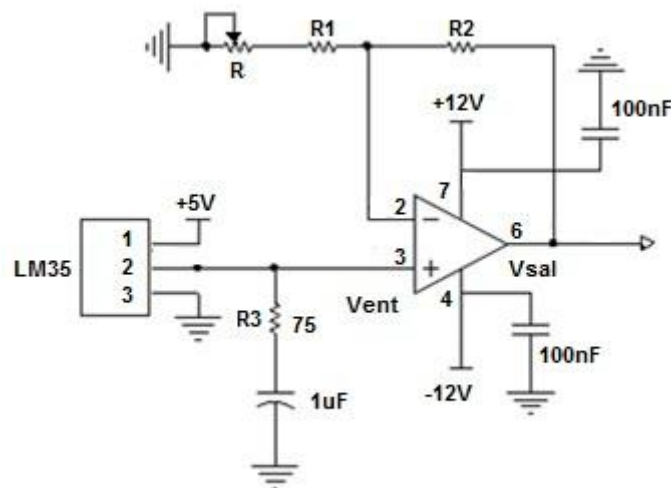


Figura 2.7. Acondicionamiento de los sensores LM35.

Para determinar la ganancia necesaria en el amplificador no inversor se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$V_{sal} = V_{ent} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.5)$$

$$G_{NI} = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.6)$$

Donde:

V_{sal} Voltaje de salida del OPA27.

V_{ent} Voltaje de entrada al OPA27.

G_{NI} Ganancia del amplificador OPA27.

Considerando que la máxima tensión de entrada al acondicionador es de 1000mV, cuando se tiene la temperatura máxima, 100 °C, es necesario amplificar hasta los 5 V, utilizando la ecuación 2.6 resulta que:

$$G_{NI} = \frac{V_{salNI}}{V_{ent}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{5V}{1000mV} = 5$$

Si se toma $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$ resulta $R_1 = 8.25 \text{ k}\Omega$. Para compensar el error de ganancia en el amplificador, se fija R_1 en 10% por debajo de su valor, donde, $R_1 = 7.4 \text{ k}\Omega$, debido a que este valor de resistencia no se fabrica, se coloca una resistencia de 2.2 k Ω en serie con otra de 5 k Ω , donde $R_1 = 7.2 \text{ k}\Omega$. Para el ajuste fino de la ganancia se utiliza un potenciómetro multivuelas en serie con R_1 , que sea superior al $\pm 10\%$ de 8.25 k Ω , el cual se escoge de 2.2 K Ω , como se muestra en la figura 2.7. En la tabla 2.5 se muestran los valores de las resistencias.

Tabla 2.5. Valores de R, R_1 y R_2 para amplificar la señal del sensor de temperatura LM35.

Rango de trabajo	R (k Ω)	R_1 (k Ω) $\pm 1\%$	R_2 (k Ω) $\pm 1\%$
0-5 V	2.2	7.2	33

➤ **Análisis del error total para la medición de temperatura con el sensor LM35**

El canal de medición se encuentra formado por tres elementos: el sensor, el amplificador y la tarjeta de adquisición de datos, de forma que el error de la medición en el canal se determina a través de la siguiente ecuación.

$$\delta T = \delta_{LM35} + \delta_{OPA27} + \delta_{TCAD} \quad (2.7)$$

Donde:

δ_{LM35} Error del sensor LM35.

δ_{OPA27} Error del amplificador.

δ_{TCAD} Error del CAD.

➤ **Análisis de error para el sensor LM35**

Para determinar el error máximo del sensor LM35 hay que tener en cuenta, la suma de las componentes que se mantienen constantes, las componentes que varían de acuerdo a la temperatura medida y el error de no linealidad (Rodríguez & Jimenez, 1995), según los datos suministrados por el fabricante, los cuales se muestran a continuación.

- Sensibilidad $S_{LM35} = 10mV\ ^\circ C$
- Coeficiente del error de ganancia $K_G = \pm 0.2\ mV\ ^\circ C$
- Error de no linealidad $\Delta NL = \pm 0.5^\circ C$
- Error por regulación de la carga $E_{RL} = \pm 0.2\ mV\ V$
- Resistencia térmica $\emptyset = 120\ ^\circ C\ W$
- Corriente de consumo $I_{Disp} = 138\ \mu A$ para una temperatura de $98\ ^\circ C$.

Las características eléctricas principales del sensor, así como su diagrama de conexión, son mostradas en el anexo 5. Para realizar el cálculo del error se utiliza la siguiente ecuación.

$$\delta_{LM35} = \delta_{NL} + \delta_{fij} + \delta_{var} \quad (2.8)$$

Donde:

δ_{NL} Error de no linealidad.

Errores fijos (δ_{fij})

δ_{K_G} Error de ganancia.

δ_{off} Error de offset (Este error resulta despreciable según el fabricante).

Errores variables (δ_{var})

δ_{RL} Error debido a la variación de voltaje en la fuente de alimentación.

δ_{AUT} Error por el autocalentamiento del sensor.

✓ Error de no linealidad.

Para calcular el error absoluto de no linealidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{NL} = \frac{\Delta NL}{\text{Campo de medición}} \quad (2.9)$$

Expresado de forma relativa:

$$\delta_{NL} = \frac{\pm 0.5^{\circ}\text{C}}{98^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% = 0.5\%$$

✓ Error debido a la variación de voltaje en la fuente de alimentación.

Para determinar el error por la variación de la fuente de alimentación del sensor hay que tener en cuenta que la fuente tiene una variación de ± 0.25 V y utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{RL} = \frac{E_{RL} \cdot \Delta V}{S_{LM\ 35}} \quad (2.10)$$

$$\Delta E_{RL} = \frac{\pm 0.2\text{mV}/V \cdot 0.25V}{10\text{mV}/^{\circ}\text{C}} = \pm 0.005^{\circ}\text{C}$$

Expresado de forma relativa:

$$\delta_{RL} = \frac{\pm 0.005^{\circ}\text{C}}{98^{\circ}\text{C}} \cdot 100 = \pm 0.005\%$$

Se puede considerar que este error es despreciable.

✓ Error de ganancia.

El error de ganancia se determina a través de la siguiente ecuación.

$$\Delta K_G = \frac{K_G \cdot \text{Campo de medición}}{S_{LM\ 35}} \quad (2.11)$$

Al sustituir en (2.11)

$$\Delta K_G = \frac{\pm 0.2\text{mV}/^{\circ}\text{C} \cdot 98^{\circ}\text{C}}{10\text{mV}/^{\circ}\text{C}} = \pm 1.96^{\circ}\text{C}$$

Expresado en forma relativa:

$$\delta_{K_G} = \frac{\pm 1.96^{\circ}\text{C}}{98^{\circ}\text{C}} \cdot 100 = \pm 2\%$$

El error de ganancia por ser fijo, puede ser compensado, reducido o eliminado.

✓ Error por el autocalentamiento del sensor.

Para el cálculo del error por autocalentamiento hay que tener en cuenta la potencia que se disipa en el sensor, la cual depende de la tensión V_{CC} de la fuente de alimentación y de la corriente I_{Disp} , que consume el sensor, para su trabajo. La potencia, que se disipa en el sensor, se determina por la siguiente ecuación.

$$P_D = I_{Disp} \cdot V_{CC} = 138\mu A \cdot 5V = 0.69mW \quad (2.12)$$

Luego el incremento de temperatura por el autocalentamiento se determina por:

$$\Delta T_{AUT} = P_D \cdot \theta_{LM35} \quad (2.13)$$

Para este tipo de encapsulado, según el fabricante la resistencia térmica es de $\theta = 90^\circ C/W$.

Al sustituir en la ecuación 2.13, se tiene.

$$\Delta T_{AUT} = 0.69mW \cdot 90^\circ C/W = 0.06^\circ C$$

Expresado en forma relativa:

$$\delta_{AUT} = \frac{0.06^\circ C}{98^\circ C} \cdot 100 = 0.06\%$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación 2.8 se obtiene el error relativo total del sensor, donde:

$$\delta_{LM35} = 0.5\% + 2\% + 0.06\% = 2.6\%$$

Este error puede ser reducido, si se elimina o compensa el error de ganancia del sensor LM35, quedando:

$$\delta_{LM35} = 0.5 \%$$

➤ **Calculo del error del amplificador no inversor**

El amplificador no inversor se hace en base al amplificador operacional OPA27, cuyos datos principales para el cálculo de error se muestran a continuación.

- Tensión de desplazamiento $e_d = \pm 100\mu V$.
- Deriva térmica $T_{Ked} = 1.8\mu V/^\circ C$.

- Consumo de corriente: $I_D = 5.7mA$.
- Resistencia térmica $\theta = 90^\circ C/W$.
- Rechazo al modo común $CMM = 122 dB$.

En el anexo 6 se pueden observar las características principales del OPA27. Partiendo de estos datos suministrados por el fabricante y para determinar el error máximo, se utiliza la siguiente ecuación.

$$\delta_{OPA27} = \delta_{ed} + \delta_{G_{NI}} + \delta_{CMM} \quad (2.14)$$

Donde:

δ_{ed} Error producido por la tensión de desplazamiento y su variación con la temperatura.

$\delta_{G_{NI}}$ Error de ganancia producto a la tolerancia de los resistores.

δ_{CMM} Error de rechazo al modo común.

✓ Error producido por la tensión de desplazamiento y su variación con la temperatura.

Para determinar el incremento de temperatura por el autocalentamiento del circuito integrado, es necesario considerar la potencia que se disipa en el mismo según la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{aut} = P_D \cdot \theta \quad (2.15)$$

Donde:

$$P_D = I_D \cdot V_{CC} \quad (2.16)$$

P_D - potencia disipada por el circuito integrado.

V_{CC} – voltaje de alimentación para el diseño, $\pm 12V$.

Resulta que:

$$P_D = 5.7mA \cdot 12V = 68.4mW$$

Al sustituir en la ecuación (2.15) se obtiene el incremento de temperatura.

$$\Delta T_{aut} = 68.4mW \cdot 90^{\circ}C/W = 6.15^{\circ}C$$

Para determinar el error de la variación de tensión de desplazamiento se tiene en cuenta la variación de temperatura, donde:

$$\Delta T = T_{trab} + \Delta T_{aut} - T_{ref} \quad (2.17)$$

Donde:

T_{trab} Temperatura ambiente en el local donde se encuentra el circuito integrado, considerando un caso extremo, por el lugar, es prudente tomar $37^{\circ}C$.

T_{ref} Temperatura de referencia de los datos del fabricante ($25^{\circ}C$).

Calculando según (2.17), se tiene que:

$$\Delta T = 37^{\circ}C + 6.15^{\circ}C - 25^{\circ}C = 18.15^{\circ}C$$

Ahora se puede determinar la tensión de desplazamiento y su variación con la temperatura según la siguiente ecuación:

$$e_{dT} = e_d + T_{Ked} \cdot \Delta T \quad (2.18)$$

Teniendo en cuenta que el error producido por el offset del OPA27, puede ser compensado mediante un potenciómetro multivuelgas de $10\text{ K}\Omega$, como lo muestra la figura 2.8, se tiene que:

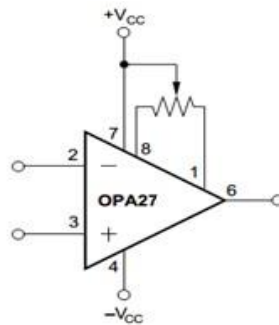


Figura 2.8. Configuración del OPA27 para eliminar el offset.

$$e_{dT} = T_{Ked} \cdot \Delta T$$

$$e_{dT} = 1.8\mu V/^{\circ}C \cdot 18.15^{\circ}C = 32.67\mu V$$

Por lo tanto el error es de:

$$\Delta E_{ed} = \frac{e_{dT}}{V_{entMax}} \quad (2.19)$$

Como la tensión máxima a la entrada del amplificador es de 1000mV, el error relativo es:

$$\delta_{ed} = \frac{32.67\mu V}{1000mV} \cdot 100 = 0.00003\%$$

Este error se puede considerar despreciable.

✓ Error de ganancia producto a la tolerancia de los resistores.

Para el caso del error de la ganancia producto a las tolerancias de los resistores (G_{NI}) y considerando que la ganancia se determina como:

$$G_{NI} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Se obtiene un error absoluto según:

$$\Delta G_{NI} = \frac{\partial G_{NI}}{\partial R_1} \cdot \Delta R_1 + \frac{\partial G_{NI}}{\partial R_2} \cdot \Delta R_2$$

Donde ΔR_1 y ΔR_2 son las variaciones de R_1 y R_2 .

Al combinar este con la ecuación 2.5 resulta:

$$\Delta G_{NI} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \cdot V_{sal}$$

El cual expresado en forma de error relativo, resulta:

$$\delta_{G_{NI}} = \frac{R_2 \cdot \left(-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)}{R_1 + R_2} \cdot 100 \% = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (\delta_{R_1} + \delta_{R_2}) \cdot 100\% \quad (2.20)$$

Como en el circuito se hace un ajuste fino de la ganancia, a través de un potenciómetro multivuelas (ver figura 2.7), este error es compensado.

✓ Error de rechazo al modo común del amplificador no inversor.

El valor del error de rechazo al modo común en un amplificador no inversor se puede calcular a través de la siguiente ecuación (Escudero & Parada, 2011).

$$\delta_{CMM} = \frac{1}{M} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

Donde:

M Es el coeficiente de rechazo al modo común.

Como este coeficiente está expresado en decibels (dB), para su conversión se utiliza la siguiente ecuación.

$$M = 10^{\frac{K_R}{20}}$$

Donde K_R es el coeficiente expresado en dB.

Al sustituir en la ecuación 2.21 se obtiene el error del rechazo al modo común.

$$\delta_{CMM} = 0.00008 \%$$

El cual se puede considerar despreciable.

Se puede apreciar que la componente que más aporta al error total es la tensión de desplazamiento, las otras componentes son iguales o menores que un tercio de esta componente, por lo que se puede decir que el error total del amplificador no inversor según la ecuación 2.14 es:

$$\delta_{OPA27} = 0.00003\%$$

➤ **Error total en la medición de temperatura**

Con los errores anteriores se puede determinar el error total del canal de medición según la ecuación 2.7:

$$\delta_T = 2.6\% + 0.003\% + 0.3\%$$

Debido a que el error del amplificador y el error del CAD, son menores en un tercio que el error del sensor LM35, pueden ser despreciados. Por lo que el error relativo en la medición de temperatura de los laterales, con los sensores LM35 es de:

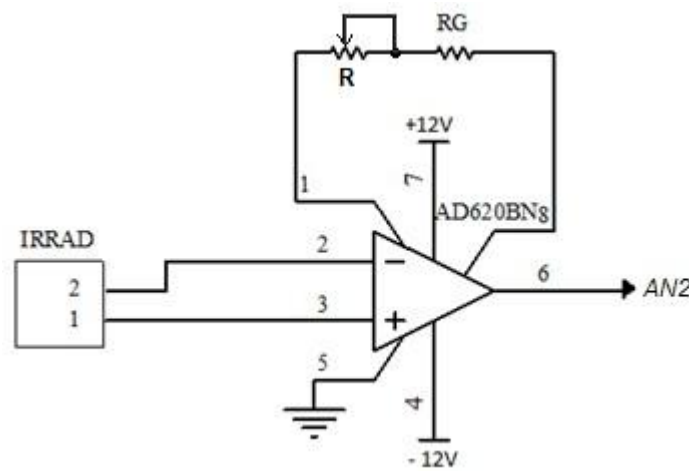
$$\delta_T = 2.6\%$$

Este error máximo en la medición de temperatura de los laterales, puede ser reducido. Para ello hay que compensar o reducir el error fijo de ganancia del sensor LM35, donde el error relativo máximo pudiera ser de:

$$\delta_T = 0.9\%$$

Sensor de Irradiancia Solar (IS)

Como es sabido, para la medición de irradiancia solar es utilizada una celda fotovoltaica, calibrada en el CIEMAT. La misma garantiza una precisión de $\pm 0.21\%$. La medición de irradiancia solar se realiza, por el puerto (AN2) del PIC, la salida de la celda es amplificada mediante un amplificador de instrumentación, el cual se coloca en el interior de la caja de conexión de la celda, donde puede alcanzar una temperatura máxima de trabajo de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. El esquema se muestra en la figura 2.9. El amplificador de instrumentación utilizado es el AD620 de la firma Analog Device y la máxima irradiancia a medir es de 1400 W/m^2 . Para consultar los datos técnicos más importantes de la celda patrón y el amplificador de instrumentación, ver anexo 7 y anexo 8 respectivamente.



Figura

2.9. Acondicionamiento para la medición de irradiancia.

Para fijar la ganancia del amplificador de instrumentación solo es necesario adicionar una resistencia al mismo, entre los pines 1 y 8. El valor de esta resistencia es calculado por la siguiente ecuación.

$$G_{AInst} = \frac{49.9k\Omega}{R_G} + 1 \quad (2.22)$$

Donde:

G_{AInst} - ganancia del amplificador de instrumentación.

R_G - resistencia que se le adiciona al amplificador de instrumentación para fijar la ganancia del circuito.

La salida de la celda para el límite superior del campo de medición de irradiancia se determina por la siguiente expresión:

$$V_{CP_{Max}} = S_{CP} \cdot Irrad_{SMax} \quad (2.23)$$

Donde:

$V_{CP_{Max}}$ Voltaje máximo a la salida de la celda patrón.

S_{CP} Sensibilidad de la celda patrón.

$Irrad_{S_{Max}}$ Irradiancia máxima.

Al sustituir en la ecuación 2.23 queda:

$$V_{CP_{Max}} = 47 \mu V / \frac{W}{m^2} \cdot 1400 \frac{W}{m^2} = 65.8 mV$$

La ganancia necesaria en el amplificador de instrumentación se determina como:

$$G_{AInst} = \frac{U_{SAD_{max}}}{V_{CP_{Max}}} \quad (2.24)$$

Donde:

G_{AInst} Ganancia del amplificador de instrumentación.

$U_{SAD_{max}}$ Voltaje máximo a la salida del amplificador de instrumentación.

Al sustituir en 2.24 queda:

$$G_{AInst} = \frac{5V}{65.8mV} = 75.98$$

Con el valor de ganancia se sustituye en la ecuación 2.22 para determinar el valor de R_G , por lo que resulta $R_G = 662.3 \Omega$. Para compensar el error de ganancia en el amplificador, se fija R_G en 10% por debajo de su valor, donde,

$R_G = 596 \Omega$, debido a que este valor de resistencia no se fabrica, se fija $R_G = 590 \Omega$. Para el ajuste fino de la ganancia se utiliza un potenciómetro multivuelgas en serie con R_G , que sea superior al $\pm 10\%$ de 662Ω , el cual se escoge de 150Ω , como se muestra en la figura 2.9. En la tabla 2.6 se muestran los valores de las resistencias.

Tabla 2.6. Valores de R , y R_G para amplificar la señal del sensor de irradiancia.

Rango de trabajo	$R (\Omega)$	$R_G (\Omega) \pm 1\%$
0-5 V	150	590

➤ **Análisis del error total para la medición de IS**

CAPÍTULO II

El canal de medición se encuentra formado por tres elementos: la celda patrón, el amplificador de instrumentación y la tarjeta de adquisición de datos, de forma que el error de la medición en el canal se determina a través de la siguiente ecuación.

$$\delta_{IRRAD} = \delta_{CELDA} + \delta_{AD620} + \delta_{TCAD} \quad (2.25)$$

Donde:

δ_{CELDA} Error de la celda patrón.

δ_{AD620} Error del amplificador.

➤ **Análisis de error del amplificador de instrumentación AD620**

El error fundamental en el amplificador de instrumentación es provocado por la tensión de desplazamiento, como en el caso anterior, se tiene en cuenta el offset y su deriva térmica, igualmente se debe tener en cuenta el autocalentamiento del amplificador, las características principales del AD620 se pueden ver en el anexo 8. Utilizando la ecuación (2.15) con los datos del AD620 mostrados a continuación:

✓ Bajo voltaje de offset: $50 \mu V$ max.

✓ Corriente de consumo $I_{Inst} = 1.3 mA$.

✓ Voltaje de offset y deriva térmica, $e_{dl} = 15 \mu V + 0.1 \cdot \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot \Delta T + \frac{200 \mu V + 2.5 \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot \Delta T}{G}$

✓ Resistencia térmica $\theta = 90 ^{\circ}C/W$.

Resulta que:

$$P_D = 15.6 mW$$

$$\Delta T_{AUT} = 1.4 ^{\circ}C$$

Para determinar el error de la variación de tensión de desplazamiento se tiene en cuenta la variación de temperatura, donde:

$$\Delta T = T_{trab} + \Delta T_{aut} - T_{ref}$$

$$\Delta T = 40 ^{\circ}C + 1.4 ^{\circ}C - 25 ^{\circ}C = 16.4 ^{\circ}C$$

Conocido el ΔT y la ganancia se puede determinar el valor de la tensión de desplazamiento total.

$$e_{dl} = 15\mu V + 0.1 \cdot \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot 16.4^{\circ}C + \frac{200\mu V + 2.5 \cdot \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot 16.4^{\circ}C}{75.98} = 19.81\mu V$$

El error relativo de la tensión de desplazamiento se determina por:

$$\delta_{AD620} = \frac{e_{dl}}{V_{CP_{Max}}} \cdot 100 = \frac{19.81\mu V}{65.8mV} \cdot 100 = 0.03\%$$

➤ **Error total en la medición de irradiancia**

Con los valores de los errores correspondientes, se puede determinar el error total del canal de medición según la ecuación (2.25):

$$\delta_{IRRAD} = 0.21\% + 0.03\% + 0.4\%$$

Debido a que el error del AD620, es menor en un tercio que el error máximo en el canal de medición, este puede ser despreciado, quedando.

$$\delta_{IRRAD} = 0.6\%$$

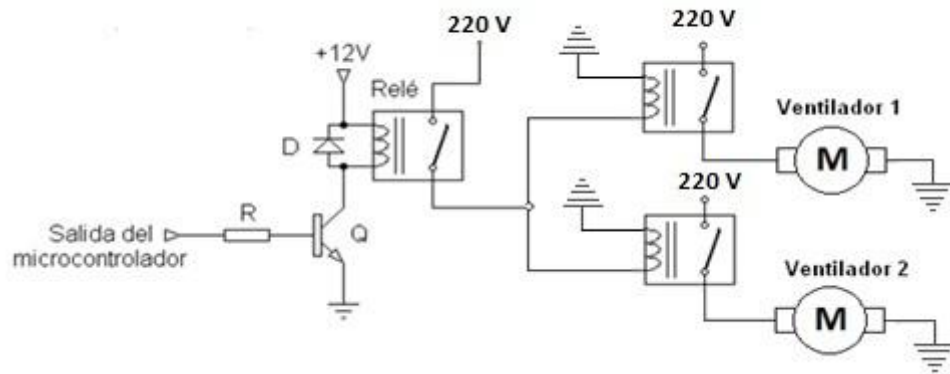
2.2.3 Bloque de actuadores

Para manipular los ventiladores laterales y el intercambiador de calor, se utiliza un circuito eléctrico que permite conectar y desconectar éstos de la red (220V CA), mediante la apertura o cierre de tres relés. Los mismos se conectan al microcontrolador por los siguientes pines:

- *RB0* - Control de los dos ventiladores del lateral Este.
- *RB1* - Control de los dos ventiladores del lateral Oeste.
- *RB2* - Control de los dos ventiladores del intercambiador.

La *figura 2.10* muestra el esquema general de cada relé independiente, como se puede observar en los tres casos hay que controlar 2 motores de corriente alterna de 220V, para ello cada relé de estado sólido (12V CD) en la placa de control, comanda dos *contactores magnéticos Telemecanique* (bobina de alimentación a 220V CA y 50 mA), uno para cada motor.

Las salidas del microcontrolador son capaces de suministrar solo 25 mA, por lo que se utilizan transistores de propósito general, del tipo BC547, en régimen de corte y saturación, para manejar los niveles de corriente necesarios en el funcionamiento correcto de los relés, además de limitar la potencia disipada en el microcontrolador. (Figura 2.10).



Figura

2.10. Circuito de acoplamiento de los relés al microcontrolador.

Para calcular el valor de R , que es la resistencia que limita el valor de la corriente suministrada por el microcontrolador, y a su vez polariza al transistor Q , se comienza por determinar cuál es el valor de corriente necesario para un correcto funcionamiento del relé. De la hoja de datos de este componente se conoce que el valor adecuado es 40mA, por tanto el valor de I_c para el transistor es de 40mA. De la hoja de datos del transistor se obtiene que para las condiciones dadas, la ganancia de corriente (β_{sat}) tiene un valor típico de 120, al aplicar la siguiente ecuación se obtiene:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta_{sat}} \quad (2.26)$$

$$I_b = \frac{40mA}{120} = 0.33mA$$

Teniendo en cuenta la caída de voltaje base-emisor en el transistor, la cual es aproximadamente igual a 1V, entonces queda:

$$R_b = \frac{5V - 1V}{I_b} = 10k\Omega$$

En estos circuitos es necesaria la inclusión del diodo D , entre los terminales de la bobina del relé, debido a que, cuando se desenergiza, por un proceso de autoinducción se genera un voltaje inverso entre sus terminales que puede superar el valor máximo permitido para el transistor y provocar su mal funcionamiento o destrucción. Este voltaje aparece con la polaridad en sentido de conducción del diodo, y se descarga a través de este, con lo que queda protegido el transistor.

2.2.4 Bloque de Comunicación

En la actualidad existen muchas vías de comunicación entre los dispositivos de adquisición de datos y los sistemas de supervisión, ya sea por vía inalámbrica, implementada a través de varios protocolos de comunicación, como pueden ser; redes WI-FI, redes Bluetooth, redes ZigBee y redes GSM, o a través de buses de campo, mediante los protocolos RS485, Modbus, Fielbus y Canbus.

Para el presente trabajo se selecciona el protocolo RS485, debido a las a largas distancias entre el secador solar y los laboratorios donde se realiza el monitoreo del proceso. Además este protocolo permite la conexión al bus de datos RS485, existente en las instalaciones del CIES, el cual es usado para el monitoreo de un sistema fotovoltaico de conexión a la red eléctrica convencional.

El protocolo RS 485 es un estándar de comunicación. El mismo está definido como un sistema en bus de transmisión multipunto diferencial, es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias (35 Mbps hasta 10m y 100Kbps en 1200m) y a través de canales ruidosos, ya que reduce los ruidos que aparecen en los voltajes producidos en la línea de transmisión.

El circuito integrado para implementar el protocolo en el presente trabajo, es el MAX485 (ver figura 2.11). El cual está conectado a las líneas de recepción y transmisión (RC6 y RC7) del microcontrolador. Sin embargo es importante destacar que para el empleo del Standard RS485 es necesario habilitar la recepción o transmisión a través del MAX485, esto se logra mediante la puesta de un “1 lógico” para la transmisión o un “0 lógico” para la recepción, por el pin RC5 del microcontrolador. En la figura 2.11 se muestra la interface de comunicación RS485, entre la tarjeta de adquisición de datos y la PC.

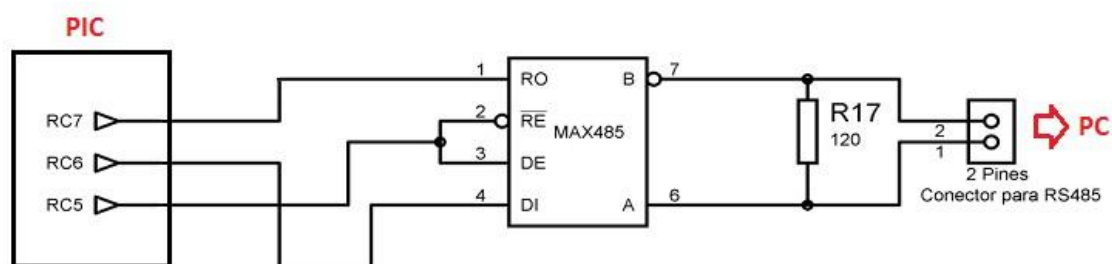


Figura 2.11. Esquema de la comunicación RS485.

Para poder utilizar el protocolo *RS485* en la PC, se cuenta con un adaptador *PCI* a puerto Serie/Paralelo del fabricante *MosChip*, modelo *MCS9865*. El cual brinda la posibilidad de configurar la PC para realizar mediciones por 3 vías distintas, *RS232*, *RS422*, *RS485*.

2.2.5 Fuente de alimentación

Como criterio de diseño para la fuente de alimentación se utiliza de referencia el consumo total de corriente de todos los componentes del sistema, más un factor de seguridad del 20%, siendo este consumo total, de 165mA para +5V, 550mA para +12V y 22mA para -12V. Las tensiones +/- 12V son utilizadas en los circuitos acondicionadores y en el bloque de actuadores; la tensión de 5V se emplea en el resto del circuito. Se ha diseñado una fuente para satisfacer esta demanda, que se muestra en la figura 2.12.

Los reguladores de voltaje integrados utilizados son 7812 para +12V $\pm 0.5V$, 7805 para +5V $\pm 0.25V$ y 7912 para -12V $\pm 0.5V$. Estos reguladores son capaces de suministrar una corriente de hasta 1A, que es suficiente para +5V y +12V, 12V.

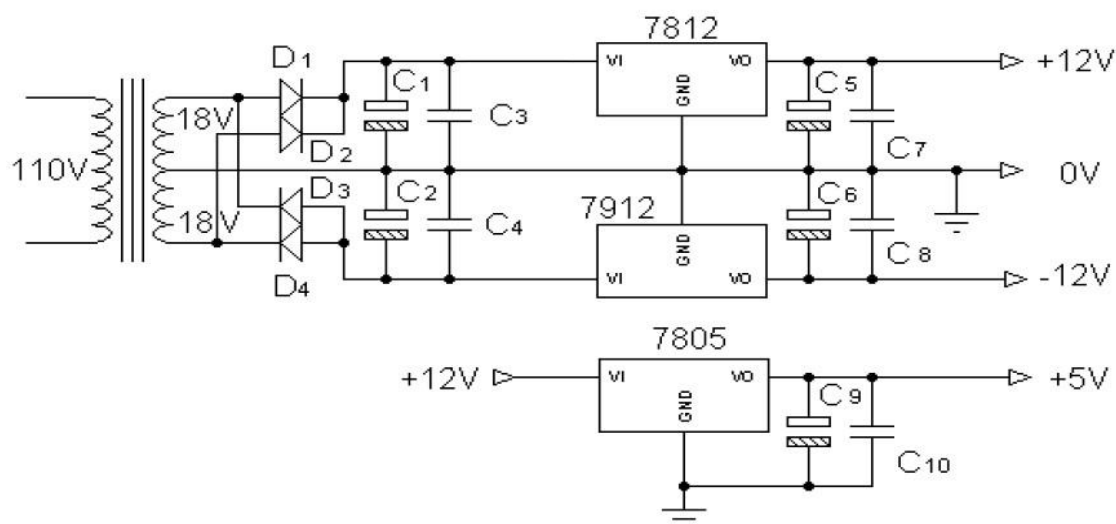


Figura 2.12. Esquema eléctrico de la fuente de alimentación.

En resumen los bloques del hardware de la tarjeta de adquisición y control, diseñada para implementar el control y monitoreo del secador solar bajo estudio. Cumple con los requisitos impuestos para su diseño, y cada uno de los bloques que la conforman se implementa durante el transcurso de esta investigación, hasta quedar completamente desarrollado, el esquema eléctrico general de la tarjeta de control se muestra en el anexo 9, además se muestran en el anexo 10, imágenes de la tarjeta controladora.

2.2.6 Descripción del *firmware*

En el presente epígrafe se realiza la descripción del *firmware* que se emplea en la programación de la tarjeta controladora del secador solar. La programación del microcontrolador se realiza mediante el programa “CCS Compiler v.4”. La estructura del mismo está concebida para que la tarjeta controladora pueda trabajar de forma automática ó manual y al mismo tiempo permitir la supervisión

del proceso desde la aplicación desarrollada para su monitoreo. Además se describe el protocolo desarrollado para la comunicación entre la tarjeta de adquisición y control y la PC. Para una mejor comprensión de la programación del *firmware*, se describen a continuación las condiciones de control del secador solar.

✓ **Condiciones de control**

Siguiendo las recomendaciones de los investigadores del CIES, se fijan los valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado, los cuales son de 55 °C y 35 °C para la temperatura y de 80% y 20% para la humedad relativa, respectivamente. Estos valores pueden ser cambiados en dependencia del producto a secar o a conveniencia del investigador a cargo.

Con el objetivo de controlar la humedad relativa y la temperatura en el interior de la cámara de secado, así como homogenizar la masa de aire dentro de esta, se han establecido las siguientes condiciones de control:

Condiciones de control en el Intercambiador de calor

- Si la temperatura promedio de los tres sensores interiores excede el límite máximo (55 °C *por defecto*), entonces se conectan los ventiladores del intercambiador de calor, hasta que la misma disminuya 10°C (*histéresis por defecto*).
- Si la humedad relativa promedio de los tres sensores interiores excede el límite máximo (80% *por defecto*), entonces se conectan los ventiladores del intercambiador de calor, hasta que la misma disminuya un 10 % (*histéresis por defecto*).
- Si se trabaja en modo de control de humedad relativa, por exceder el máximo permisible dentro de la cámara de secado, y la temperatura promedio de los tres sensores interiores es menor que el set-point de temperatura mínima (35 °C *por defecto*), entonces se desconectan los ventiladores del intercambiador.
- Si la humedad relativa promedio de los tres sensores interiores es menor en un 15%, que la humedad relativa en el exterior del secador, no se encienden los ventiladores del intercambiador.

Para poder homogenizar la mezcla de aire dentro de la cámara de secado se manipulan los ventiladores de los laterales de la siguiente forma:

Condiciones de control de los ventiladores laterales

- Si la temperatura en el Lateral Este (LE) es mayor que en el Lateral Oeste (LO), entonces se conectan los ventiladores del LO (lateral contrario).
- Si la temperatura en el LO es mayor en 5 °C que el LE, una vez trabajando los ventiladores del LO, entonces se conectan los ventiladores del LE (lateral contrario), para evitar la conexión y desconexión continua de los ventiladores en horas del mediodía.
- Si la irradiancia medida es menor que 50 W/m², se desconectan todos los ventiladores laterales.

✓ **Arquitectura del programa**

El pseudo-código de programación que permite implementar la automatización del secador solar empleando la tarjeta de adquisición y control, se describe a continuación. La secuencia de trabajo se puede apreciar en la figura 2.13:

Paso 1:

- Configurar los recursos del PIC18F4620.
- Configurar la Interrupción del Puerto Serie (RDA).
- Configurar los puertos B y C.
- Configurar el CAD para los canales del (0 al 2). - Configurar la comunicación serie.

Paso 2:

- Inicializar en modo de control automático.
- Inicializar los ventiladores laterales apagados.
- Inicializar los ventiladores del intercambiador apagados.
- Leer memoria EEPROM interna del PIC, para obtener los últimos valores máximos, mínimos y de histéresis, guardados para el control de temperatura y humedad.

Paso 3:

- Encuesta el puerto serie por un dato entrante.
- Si no hay un nuevo dato, y el sistema está en automático, se ejecuta el

“Paso 4”, sino vuelve a comenzar el “Paso 3”.

- Si se recibe algún dato, leer el puerto serie y ejecutar la acción correspondiente al comando recibido.

Paso 4:

- Se miden todos los sensores.
- Se compara con los parámetros de control almacenados en la memoria EEPROM del microcontrolador y se ejecuta la rutina de control. - **Paso 5:**

- Se regresa a la posición de espera en el “paso 3”.
- Si hay parada por emergencia se va al “paso 6”.

Paso 6:

- Se espera por la orden de desactivación de parada por emergencia.
- Si se da la orden de salir del modo emergencia, se va hacia el “paso 2”.

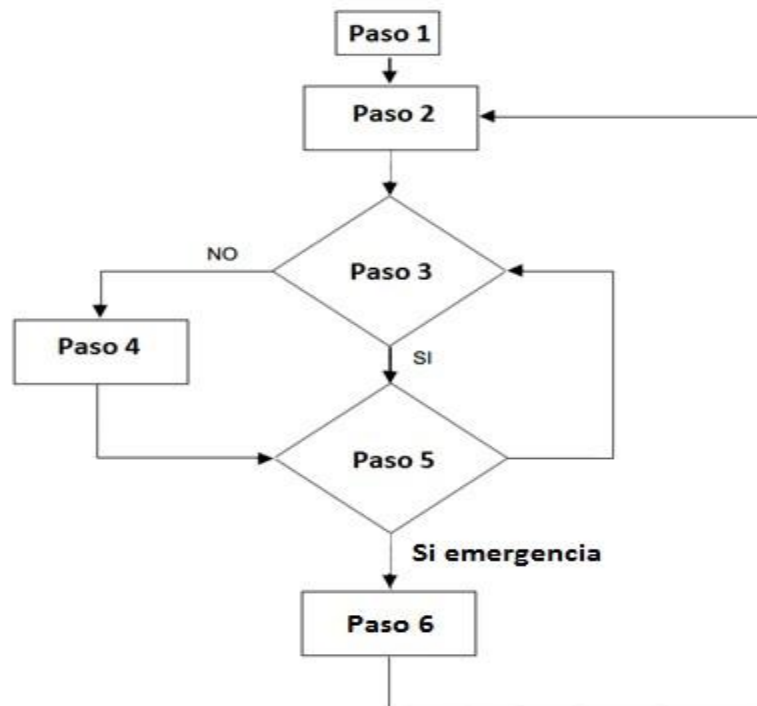


Figura 2.13. Secuencia de trabajo del firmware en la Tarjeta de adquisición y control.

2.2.7 Protocolo de comunicación

Para realizar la comunicación entre la tarjeta de adquisición y la PC, se implementa un protocolo de comunicación a través del bus RS485, estructurado de la siguiente manera:

Recepción desde el microcontrolador

Forma general del comando de lectura: **Dirección Código CR**

Donde:

Dirección - es la dirección del sistema de adquisición y control en el bus de datos RS485, en este caso es (**a**).

Código - código que indica la acción a realizar (ver tabla 2.7).

CR- código que indica fin de recepción, en este caso (**13**).

Ejemplo de trama para saber el estado de los ventiladores laterales.

a 8 13

Transmisión desde el microcontrolador

Forma general de la respuesta: **Dirección DATO CR**

Donde:

Dirección - Es la dirección que indica que sistema de adquisición y control es el que está transmitiendo, en este caso es (**a**).

DATO - Respuesta a la trama mandada por la PC.

CR- código que indica fin de transmisión del microcontrolador, en este caso (**13**).

Ejemplo de respuesta del estado de los ventiladores: **a 0 13**

En la siguiente tabla se muestran los códigos que se mandan desde la PC y la función que debe realizar el microcontrolador una vez que los reciba.

Tabla 2.7. Códigos enviados desde la PC.

Código	Descripción
0	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura interior en el punto 1.</i>
1	<i>El microcontrolador lee y manda la Humedad interior en el punto 1.</i>
2	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura interior en el punto 2.</i>
3	<i>El microcontrolador lee y manda la humedad interior en el punto 2.</i>
4	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura interior en el punto 3.</i>
5	<i>El microcontrolador lee y manda la humedad interior en el punto 3.</i>

CAPÍTULO II

6	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura exterior.</i>
7	<i>El microcontrolador lee y manda la humedad exterior.</i>
8	<i>Mandar estado de ventiladores laterales.</i>
9	<i>Mandar estado del intercambiador de calor.</i>
b	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor guardado de la referencia de temperatura máxima.</i>
l	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor guardado de la referencia de humedad máxima.</i>
u	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor guardado de la referencia de temperatura mínima.</i>
w	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor guardado de la referencia de humedad mínima.</i>
z	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor de la histéresis para el control de temperatura.</i>
y	<i>El microcontrolador lee la EEPROM interna y manda el último valor de la histéresis para el control de humedad.</i>
q	<i>Si esta en modo manual, encender ventiladores lateral este.</i>
e	<i>Si esta en modo manual, encender ventiladores lateral oeste.</i>
r	<i>Si esta en modo manual, apagar ventiladores lateral este.</i>
t	<i>Si esta en modo manual, apagar ventiladores lateral oeste.</i>
i	<i>Si esta en modo manual, encender ventiladores del intercambiador de calor.</i>
o	<i>Si esta en modo manual, apagar ventiladores del intercambiador de calor.</i>
p	<i>Modo control manual - activar control manual.</i>
s	<i>Modo control automático - activar control automático.</i>
j	<i>El microcontrolador lee y manda el valor de irradiancia.</i>
f	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura en el lateral Este</i>
g	<i>El microcontrolador lee y manda la Temperatura en el lateral Oeste</i>
a	<i>El microcontrolador debe entrar en modo de emergencia</i>
55	<i>El microcontrolador debe salir del modo de emergencia</i>

Códigos de configuración de los parámetros de control.

Para mandar los set point de temperatura y humedad, así como los valores de histéresis, desde la PC al microcontrolador se utiliza la siguiente trama:

Forma general: **Dirección Código DATO CR**

Donde:

Dirección - Es la dirección que indica que sistema de adquisición y control es el que está transmitiendo, en este caso es (**a**).

Código - Código que indica la variable a guardar (ver tabla 2.8).

DATO – Valor del dato a guardar.

CR- Código que indica el fin de transmisión del microcontrolador, en este caso (**13**).

Ejemplo de código para set de temperatura máxima: **a m 55 13**

Todos estos valores de control son almacenados en la memoria EEPROM del microcontrolador.

Tabla 2.8. Códigos de configuración de los parámetros de control.

Código	Descripción
m	<i>El operador manda desde la PC el valor de referencia de temperatura máxima.</i>
n	<i>El operador manda desde la PC el valor de referencia de humedad máxima.</i>
h	<i>El operador manda desde la PC el valor de referencia de temperatura mínima.</i>
k	<i>El operador manda desde la PC el valor de referencia de humedad mínima.</i>
d	<i>El operador manda desde la PC el valor de histéresis de temperatura.</i>
x	<i>El operador manda desde la PC el valor de histéresis de humedad.</i>

2.3 Descripción del software para la supervisión del sistema

En esta sección se describe una interfaz gráfica, que tiene como finalidad, registrar las mediciones, configurar, monitorear y realizar el control manual de la tarjeta de adquisición y control diseñado.

El desarrollo de esta aplicación permite al usuario una visión detallada del estado y operación del sistema, así como del comportamiento del proceso de secado mediante la visualización y registro de las variables físicas que intervienen en este. El software de supervisión se desarrolla sobre el ambiente de Labwindows CVI 9.0. Al mismo tiempo, para el diseño se tuvieron en cuenta recomendaciones de especialistas del departamento de Termoconversión en el CIES.

2.3.1 Ventana principal del software de supervisión

Esta aplicación cuenta con una ventana principal, desde la cual se puede acceder a las distintas funciones del software, como lo muestra la figura 2.14. En ella se presentan seis opciones, detalladas de la siguiente manera:

- 1- **SISTEMA:** Muestra el estado general del secador.
- 2- **GRÁFICOS:** Muestra el histórico de forma gráfica de las distintas variables que intervienen en el proceso de secado.
- 3- **REFERENCIAS:** Para fijar los valores de setpoint e histéresis, además de cambiar el modo de trabajo (manual o automático).
- 4- **GUARDAR:** Para guardar las distintas variables del proceso.
- 5- **RS485:** Configurar el puerto de comunicación.
- 6- **EMERGENCIA:** Parada del proceso por emergencia.



Figura 2.14. Ventana principal del supervisorio.

2.3.2 Configuración del puerto de comunicación

Al iniciar la aplicación, primeramente se debe configurar la comunicación de la PC con el sistema de medición y control. Con este objetivo, la ventana principal posee la opción *RS485*. Como se muestra en la figura 2.15 se podrá elegir el puerto *RS485* donde está conectado el sistema de adquisición y control, así como la velocidad de comunicación, la cual, por defecto es de 9600 baudios.



Figura 2.15. Configuración del puerto de comunicación.

La figura 2.16 muestra la interfaz gráfica del dispositivo de comunicación serie conectado al puerto PCI de la PC. La misma debe ser configurada para realizar mediciones a través del protocolo *RS485*.

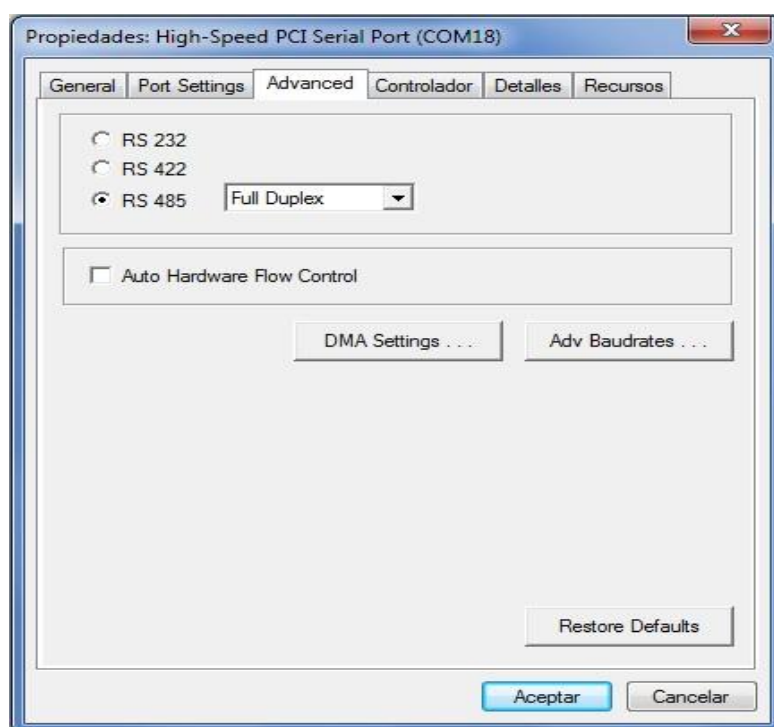


Figura 2.16. Ventana para configurar la comunicación RS485.

2.3.3 Estado del proceso

Para visualizar el estado de funcionamiento general del proceso, se debe pulsar en la opción *SISTEMA*. Donde se pueden observar los valores de las distintas variables presentes en el proceso de secado, así como los valores de setpoint e histéresis, de temperatura y humedad prefijados. También se muestra el estado de los ventiladores laterales y el intercambiador de calor, ver figura 2.17. Al iniciar esta ventana, automáticamente la PC manda los códigos necesarios a la tarjeta de adquisición y control para obtener todos estos parámetros. Además lee de la

tarjeta los últimos valores de setpoint e histéresis guardados en la memoria de programa del microcontrolador. Las mediciones son actualizadas por defecto cada 30 segundos, debido a que las magnitudes mostradas son de cambios lentos y además para dar tiempo suficiente al microcontrolador en la realización de sus tareas de control.

Resumen de las funciones de la ventana SISTEMA:

1- Medición y visualización de:

- Temperatura Interior 1.
- Temperatura Interior 2.
- Temperatura Interior 3.
- Temperatura exterior.
- Temperatura lateral Este.
- Temperatura lateral Oeste.
- Humedad relativa interior 1.
- Humedad relativa interior 2.
- Humedad relativa interior 3.
- Humedad relativa exterior. □ Irradiancia.

2- Lee y visualiza el estado de:

- Ventiladores lateral este.
- Ventiladores lateral oeste.
- Intercambiador de calor.

3- Lee y visualiza:

- Referencia de temperatura interna máxima.
- Referencia de temperatura interna mínima.
- Referencia de humedad relativa interna máxima.
- Referencia de humedad relativa interna mínima.
- Histéresis para el control de temperatura.
- Histéresis para el control de humedad.



Figura 2.17. Información general del secador solar.

2.3.4 Histórico del proceso

Para visualizar el histórico de las variables que intervienen en el proceso de secado, se debe pulsar en la opción *GRÁFICOS*. Donde aparecen los gráficos para los registros de temperatura, humedad relativa e irradiancia. El mismo brinda la opción de visualizar el comportamiento individual de cada sensor o de todos a la vez. También da la posibilidad de, mediante la opción *AUTOESCALA*, poder visualizar tales registros en un rango más detallado, así como poder cambiar dicho rango de forma manual (ver figura 2.18).

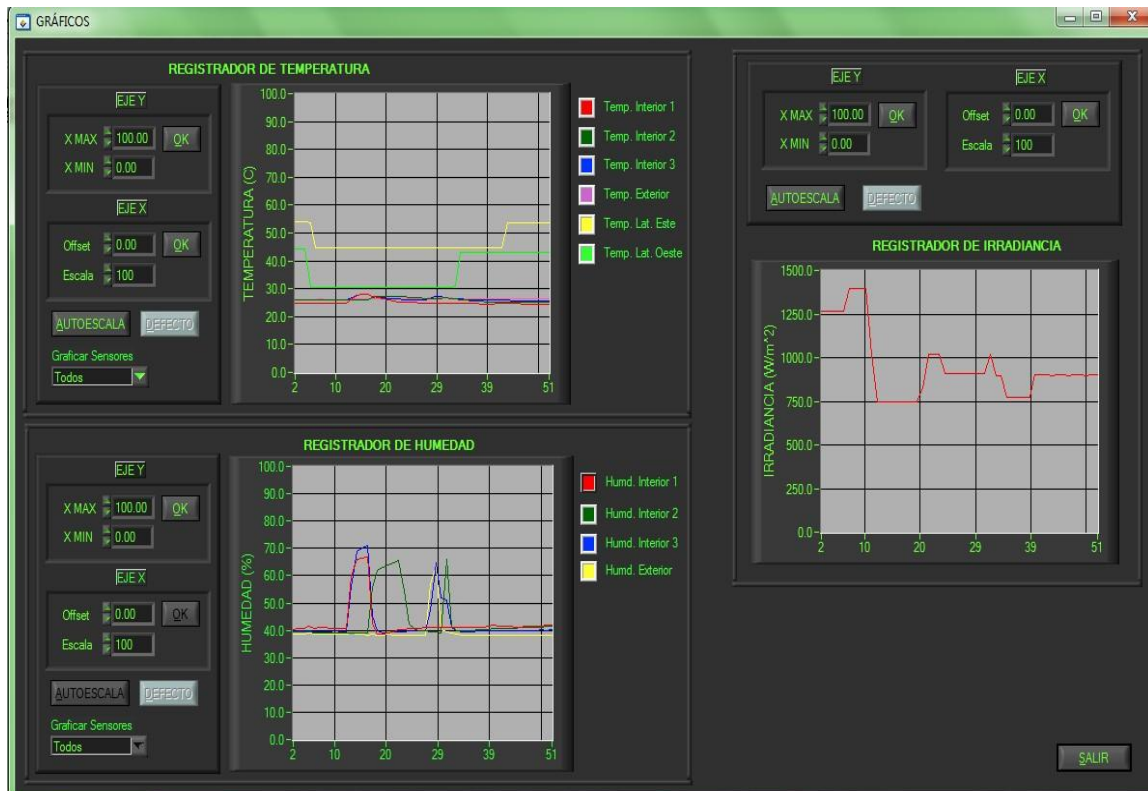


Figura 2.18. Histórico del proceso.

2.3.5 Referencias y modo de operación

Para poder acceder a la ventana de *Referencias y modo de operación*, es necesario identificarse, evitando así que personal no autorizado pueda cambiar los valores de setpoint e histéresis, así como el modo de operación del sistema (ver figura 2.19).



Figura 2.19. Identificación del especialista.

Una vez que el personal autorizado se haya identificado se muestra la ventana *Referencias y modos de operación*, la cual se puede observar en la figura 2.20.



Figura 2.20. Configuración del sistema de control.

En esta ventana es posible variar los parámetros de control, valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa, dependiendo del tipo de producto a secar, así como los valores de histéresis que se desean tener para el control del secador. Por otro lado, la misma ofrece la posibilidad de cambiar el modo de operación, manual o automático.

De trabajar en el modo manual, se muestra una nueva ventana de trabajo. Donde es posible operar los actuadores del sistema de forma manual, dígame, ventiladores laterales e intercambiador de calor, ver figura 2.21.

Si el sistema de supervisión deja de funcionar, o la PC se apaga, la tarjeta de adquisición y control pasa a trabajar en modo de operación automático.



Figura 2.21. Control manual.

2.3.6 Almacenamiento de las variables del proceso

Con el objetivo de realizar estudios futuros y trazar nuevas estrategias de control, el software ofrece la posibilidad de guardar las distintas variables medidas según se muestra en la figura 2.22. Para ello hay que pulsar en el botón *GUARDAR* de la ventana *SISTEMA*.



Figura 2.22. Guardar variables del proceso.

En dicha ventana es posible elegir las distintas variables que se desean guardar, así como fijar el tiempo de guardado, en un fichero “txt”.

2.3.7 Emergencia

En caso de ocurrir algún problema, el operador tiene la posibilidad de parar el proceso por completo, simplemente presionando sobre el botón de *EMERGENCIA* en la ventana principal del software. Donde se provoca la aparición de una nueva ventana, la cual se muestra en la figura 2.23, dando la posibilidad al sistema, de entrar en modo de emergencia o salir del modo de emergencia.



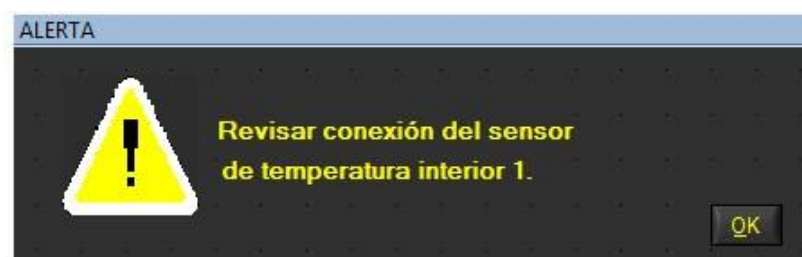
Figura 2.23. Ventana para activar-desactivar parada de emergencia.

Para ello, la PC manda la orden de cambiar una bandera de estado en el microcontrolador, al estar activa dicha bandera se ejecuta la sub-rutina correspondiente a la parada por emergencia, donde el microcontrolador deja de realizar todas sus funciones y entra en modo de espera.

Para sacar al microcontrolador del modo espera se puede hacer a través del software de supervisión, en la ventana mostrada en la figura 2.23, o a través de un reset por *hardware* en la placa de adquisición y control.

2.3.8 Alarmas y Fallos

Para conocer en todo momento el correcto funcionamiento del sistema, en cada uno de los sensores y actuadores se lleva a cabo un monitoreo de posibles fallos. Para ello el microcontrolador manda a la PC un código específico de cada sensor y actuador, en caso de fallo o rotura. Por ejemplo, si en la medición de temperatura interior en el punto 1, el microcontrolador detecta que no hay presencia del sensor, debido a mala conexión o desperfecto del sensor. Entonces se manda el código correspondiente al fallo hacia la PC, donde se muestra inmediatamente una ventana con dicha alarma en el supervisorio, como se muestra en la figura 2.24.



2.24. Ejemplo de alerta por fallo.

Figura

Igualmente, si algún sensor esta cerca de los límites máximos o mínimos permisibles, se muestra una alerta al operador, indicándole la proximidad de un evento inusual. Ejemplo de ello se puede ver en la figura 2.25.



Figura 2.25. Ejemplo de alerta por posible evento inusual.

2.4 Verificación y validación a nivel de laboratorio

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema de automatización, se realiza un experimento a nivel de laboratorio. Para ello se simula un escenario parecido al de la cámara de secado. El mismo consta de los siguientes pasos:

- Se introducen los sensores de temperatura y humedad interior dentro de un paño húmedo.
- Se aplica calor con un secador comercial durante 5 minutos al paño húmedo.
- El sensor de temperatura del lateral Este, es sometido a la misma temperatura de los sensores interiores.
- El sensor de temperatura del lateral Oeste, se deja a temperatura ambiente.
- El sensor de temperatura y humedad exterior, se deja a temperatura ambiente.
- Se coloca un potenciómetro de 10 kΩ entre 5V y *tierra*, directamente en la entrada correspondiente a la medición de irradiancia solar.

Luego de someter la tarjeta de control bajo las condiciones mencionadas. Se prueba la comunicación entre la placa y el software de supervisión, donde se comprueba un correcto funcionamiento del supervisorio, al poder visualizar los diferentes estados sobre el mímico del proceso y poder configurar los valores de setpoint e histéresis a partir de éste, así como la visualización en gráficas de las tendencias asociadas a las distintas variables que intervienen en el proceso y su grabación en la PC. También se comprueban las diferentes condiciones de control programadas en la tarjeta, donde respondieron los actuadores (*Relés*) correspondientes de forma correcta.

Conclusiones Parciales II.

- 1- Se presentó el diseño e implementación de la tarjeta de adquisición y control a través del uso de un microcontrolador *PIC*, la cual cumple con todos las exigencias propuestas.
- 2- Se diseñó el software de supervisión y se comprobó su funcionamiento a nivel de laboratorio, permitiendo tener el monitoreo y control total del sistema.
- 3- Se comprobó a escala de laboratorio el funcionamiento real del *firmware* de la tarjeta controladora, evidenciando el funcionamiento de todas sus características.

CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones de esta investigación se muestran a continuación:

- 1- Se realizó una caracterización teórica e histórica de los secadores solares, así como una descripción del estado de automatización del secador existente en el CIES, que permitió obtener las bases necesarias para el diseño del sistema de supervisión y control.
- 2- Se realizó el diseño e implementación de una tarjeta de adquisición y control basada en un microcontrolador PIC, demostrándose que la misma puede ser capaz de llevar a cabo la automatización del secador solar.
- 3- Se desarrolló una aplicación en LabWindows CVI 9.0 para realizar el supervisorio del sistema de automatización desarrollado, aportando valiosa información a los investigadores del CIES, que permite optimizar los nuevos diseños de secadores solares.

RECOMENDACIONES

Para darle continuidad a esta investigación se muestran las siguientes recomendaciones:

- 1- Montar el sistema de supervisión y control en el secador solar del CIES.
- 2- Una vez trabajando el sistema, analizar los datos obtenidos del proceso de secado, para proponer otras estrategias de control.
- 3- Se debe hacer un estudio experimental de cuál es la temperatura máxima permisible para los productos que se secan en el CIES.
- 4- Se debe hacer un estudio experimental de cuál es la humedad relativa del secador cuando el producto se encuentra seco, en la instalación.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1- Abakarova, A., & García, J. (2012). Control of a solar dryer through using a fuzzy logic and low-cost model-based sensor. *Solar Dryer* .
- 2- Admero, J. (2010). *Puerto serie*. Recuperado el 25 de marzo de 2014, de <http://www.losanos80delhacker.blogspot.com/2010/labwindows-cvi-9.html>
- 3- Amer, B., & Hossain, M. (2009). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *ELSEVIER* .
- 4- Augusto, J. (2005). *Secado convencional de la guadua angustifolia*. Scientia et Technica Año XI.
- 5- Augustus, L. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 367-393.
- 6- Barreiro, P., & Arranz, P. (2012). Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- 7- Barreiro, P., & Cristina, E. (2012). Smart Sensing Applications in Agriculture and Food Industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- 8- Barreiro, P., & Valero, C. (2010). Development of smart sensors for the supervision of a solar dryer: agro-products dehydration application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- 9- Bergues, C. (1994.). *Secador Solar de Verduras*. Editorial UMST .
- 10- Bernardes, M., & Theodor, V. B. (2010). Evaluation of operational control strategies applicable to solar chimney power plants. *ELSEVIER* .
- 11- Berriz, L. (2012). *Con la ayuda del Sol*. Recuperado el 25 de enero de 2014, de <http://www.cubasolar.cu>
- 12- Berriz, L. (1992). *Secador solar de madera*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente.
- 13- Berriz, L. (2001). *Secadores solares para productos agropecuarios e industriales*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente.
- 14- Bonzon, J. (2009). *Desarrollo de un secador solar para Bambú*. Santiago de Cuba.
- 15- Bonzon, J. (2008). *Supervisión automatizada de secaderos de madera con aporte solar térmico con sensores de bajo costo*. Santiago de Cuba.
- 16- C. Oliveros, C. R. (2002). Construya un secador solar parabólico. *Avances técnicos* 305.
- 17- Calle, M. (2009). *Waste Magazine*. Recuperado el 12 de Junio de 2014, de <http://www.waste.ideal.es/solar.htm>
- 18- Cañada, J. (2010). *Cálculo y diseño de instalaciones solares térmicas*. Editorial Pueblos.
- 19- Castañeda, C., & Meza, J. (2008). Solar Drying System for the Agro-products Dehydration. *Journal of Agriculture & Social Sciences* , No. 4 (4).
- 20- Castro, C. (2005). *Introducción a SCADA*.
- 21- Cesar, C., & Berriz, L. (junio de 2010). *Generalización de secadores solares directos en Cuba*. Recuperado el 3 de febrero de 2014, de <http://www.eumed.net/rev/delos>
- 22- Chen, H. H. (2005). A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy* , 97-103.
- 23- Colomer, J., & Melendez, J. (2010). Introducción a la monitorización y supervisión experta de procesos. En *Sistemas de Supervisión* (págs. 86-150). Barcelona: Cataluña.
- 24- David Chacon, O. D. (2001). *Supervisión y control de procesos*.

BIBLIOGRAFÍA

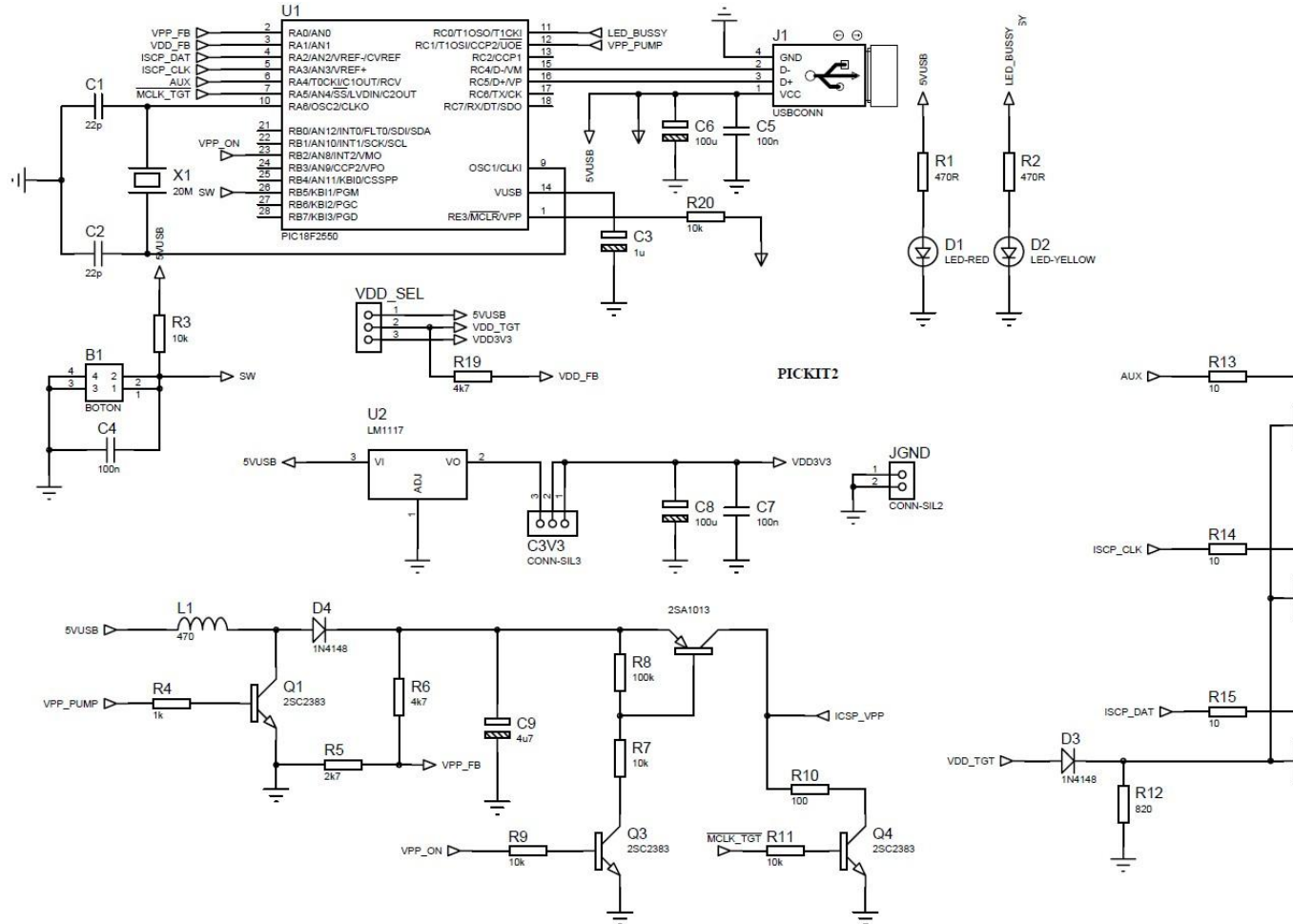
- 25- Dissa, A. (2009). Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. *Renewable Energy* , 1000-1008.
- 26- Dominguez, J. (2013). SCADA. Recuperado el 18 de septiembre de 2013, de <http://sancti-spiritus.amarillascuba.net/guia/scada.htm>
- 27- Drake, J. (2005). El amplificador de instrumentación. En *Instrumentación electrónica de comunicaciones* . Santander.
- 28- El-Aouar, A. (2003). Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (carica papaya L.). *Journal of Food Engineering* , 85-91.
- 29- Elena, M. (2009). *Secado de Madera, Criterios para Obtener Productos*. Ingeniera Forestal. Departamento de Investigación y Desarrollo – Gottert.
- 30- Escobar, R. (2005.). *Secador solar de madera y otros productos agrícolas*. . Universidad de Colombia, Colombia.
- 31- Escudero, I., & Parada, M. (2011). *Amplificadores operacionales*. Barcelona.
- 32- Fayett, D. (2005). *Optimización del porceso de secado solar para lodos residuales*. Cataluña.
- 33- Fernández, J., & Conde, M. (2007). Manual técnico de secado de maderas . *AITIM* .
- 34- Fernandez, O. (2011). Supervisión y control de procesos. Paris.
- 35- Fudholi, A., & Sopian, K. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 1-30.
- 36- Fuller, R. (2009). *Solra Drying-A technology for sutainable Agriculture and Food Production*. University of Melbourne, Australia.
- 37- Gomez, J. (2005). *Sistemas SCADA*. Recuperado el 2 de diciembre de 2013, de html.rincondelvago.com/scada.html
- 38- Gomez, R. (2001). *Sensores inteligentes e instrumentacion digital*.
- 39- Gonzales, P., & Sosa, A. (2006). *Serie de equipos para el control automático de la temperatura y la humedad relativa en procesos de secado*. Recuperado el 12 de diciembre de 2013, de <http://www.ciget.pinar.cu/Revista/No.2006-1/articulo.htm>
- 40- Hawlader, M. (2006). Drying of Guava and Papaya: Impact of Different Drying Methods. *Taylor & Francis* .
- 41- Huircan, I. (2010). *Análisis de offset en amplificadores operacionales*.
- 42- Iglesias, Y. (2010). *Trabajo de diploma: Automatización de un Secador Solar para Madera con Almacenamiento de Energía en Agua*. Santiago de Cuba.
- 43- Imre, L. (1997). *Indstrial Drying of Foods*.
- 44- Isermann, R. (2006). *CIGR handbook of Agricultural Engineers*. ISBN 1892769549.
- 45- James, S., & Simon, L. (2012). Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. *Energy for Sustainable Development* .
- 46- Jankowski, I. (2006). *Review of Wood Drying Research in Brazil*.
- 47- Jones, I. (2004). *Design and Implementation of the SNMP Agentsfor Remote Monitoring and Control via UML and Petri Nets*. IEEE transactions on control systems technology.
- 48- José, C. Manuales sobre energía renovable. En *Solar Térmica (BUN-CA)*. Costa Rica: 2012.
- 49- Kader, A. (2000). *Control de temperatura y humedad relativa*. Recuperado el 28 de octubre de 2013, de <http://www.fao.org/Wairdocs>

- 50- Karim, M., & Hawlader, M. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 4914-4925.
- 51- López, E. Protocolo RS485. En *Ingeniería en Microcontroladores*. 52- Lugones, B. *Método gráfico para el diseño de secadores solares*. 53- Mariano, S. (2012). *El proceso de secado*. Recuperado el 28 de octubre de 2013, de <http://www.secadomadera.com/>
- 54- Mendiburu, H. (2009). *Sistemas SCADA*. Recuperado el 12 de diciembre de 2013, de <http://hamd.galeon.com>
- 55- Montesino, A. (2006). *Hacia la cultura solar*. La Habana: Cubasolar 2da. edición.
- 56- Nikrooz, B., & Sayed, M. (2012). Simulation and control of fan speed in a solar dryer for optimization of energy.
- 57- Noriega, P. (2005). *Guía de uso para secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y cares*. Asunción, Paraguay.: Fundación Celestina Pérez de Almada.
- 58- Nulle, L. (2005). *Tecnologías de Medición II*. Lima.
- 59- Palacios, E. (2004). *Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de Proyectos* . Mexico.
- 60- Pallás Areny, R. (1998). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Macombo.
- 61- Pallas, R. (1993). *Adquisición y distribucion de señales*. Barcelona: Macombo.
- 62- Pallás, R., Areny, & Wester, J. G. (1991). *Sensor and Signal Conditioning*.
- 63- Pino, A., Machado, N., & Iglesias, Y. (2010). *Adquisición de Datos y Monitoreo*. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- 64- Prakash, S., & Datta, N. (2004). Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineerin* , 305-313.
- 65- Ranieri, F. (2007). *Sistema Supervisório de Parâmetros de Máquinas Eléctricasvía TCP/IP e Painel Eletrônico de Mensagens*. . Universidade de São Paulo. Brasil.
- 66- Rashid, M. H. *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y alicaciones*. . Prentice Hall Hispanoamericana.
- 67- Reyes, A., & Cubillos, F. (2014). Dehydration of Agro Products in a Hybrid Solar Dryer Controlled through a Fuzzy Logic System. *Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile* .
- 68- Reyes, A., Cubillos, A., & Vásquez, J. (2014). Control System in a Hybrid Solar Dryer. *Universidad de Santiago de Chile, Chile* .
- 69- Rivas, H., & Camejo, E. (2014). *Informe de proyecto CIES*. Santiago de Cuba.
- 70- Rodriguez, J., & Jimenez, J. (1995). *Introducción a la Electronica de Medida II*. Universidad de Alcala.
- 71- Ruiz-Garcia, L. B. (2010). Testing ZigBee Motes for Monitoring Refrigerated Vegetable Transportation under Real Conditions. *Sensors* 10(5). 4968-4982.
- 72- Sachenko, A., & Kochan, V. (2001). *Error Compensation in an Intelligent Sensing Instrumentation System*. Budapest, Hungary.
- 73- Semiconductor, N. (noviembre de 2000). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Recuperado el 25 de enero de 2014, de <http://www.national.com>
- 74- Semiconductor, N. (2000). *LM78LXX Series, 3-Terminal Positive Regulators* .
- 75- Semiconductor, N. (1994). *LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators*.
- 76- Semiconductor, N. (2000). *TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational*

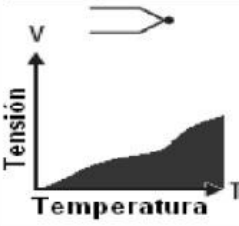
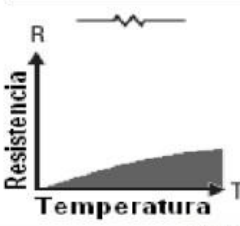
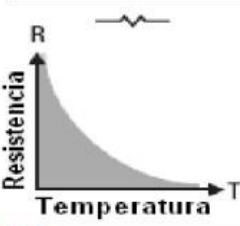
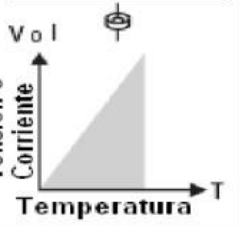
BIBLIOGRAFÍA

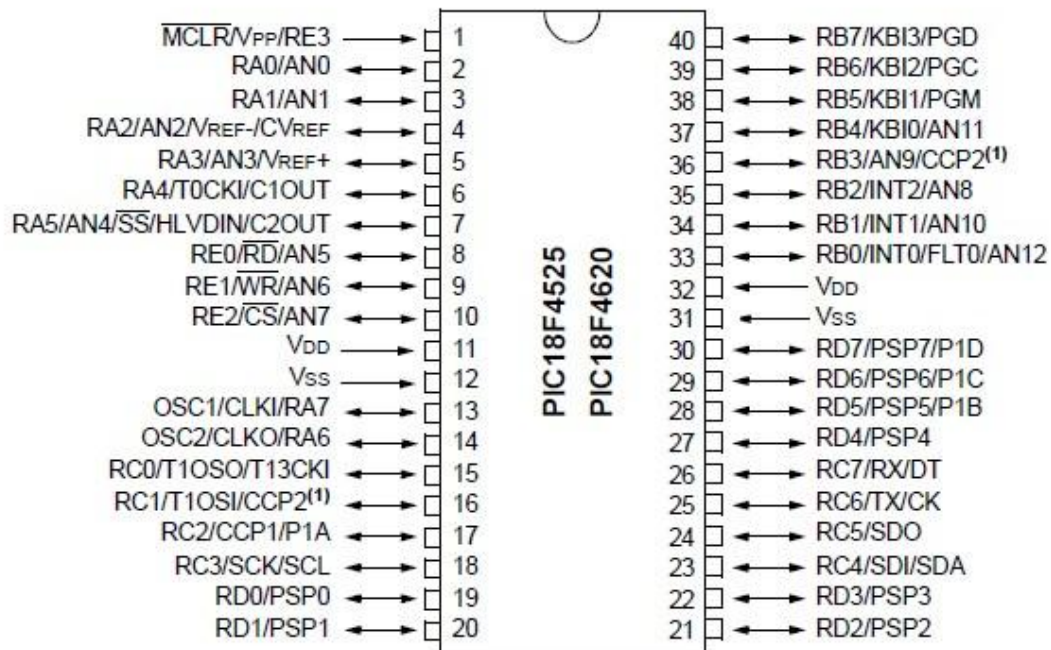
- Amplifier.*
- 77- Sensirion. (septiembre de 2008). *Datasheet SHT7x version 4.1*. Recuperado el 5 de julio de 2012, de <http://www.sensirion.com/>
- 78- Tatiana, H. (2010). Utilizacion de un secadero solar en el proceso de deshidratacio de zanahoria.
- 79- Tovorosky, P. (2004). *Control de acceso y monitoreo de parámetros ambientales en sala de cómputo*.
- 80- UNIFEM. (1998). *Técnicas de secado*. . Lima: ITDG.
- 81- Wang, J. (2004). Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering* , 505-511.
- 82- Wang, Y. (2003). *Energy-efficient Industrial Dryers of Berries*. Thesis of Energy System.
- 83- Weiz, W., & Josef, B. (2004). *Solar Dying*. Austria: Development Cooperation.
- 84- Wylick, V. (2009). Smart Products.

Anexo 1. Esquema eléctrico para la grabación del *firmware* al PIC



Anexo 3.

Termopar	RTD	Termistor	Sensor IC
			
VENTAJAS			
-270...+1800 °C (tipo B)	-260...+850°C (platino)	-80...+150 °C (típico)	-55...+150 °C
• Simple • Rudo (puede ser utilizado en aplicaciones de alta vibración y golpes) • Económico • Amplia variedad de formas físicas • Amplio alcance de temperatura • Buena intercambiabilidad	• Muy estable • Amplio alcance de operación • Buena exactitud • Mejor linealidad que el termopar • Excelente intercambiabilidad	• Tiempo de respuesta rápida • Medición a 2 hilos • Cambios grandes de resistencia vs. Temperatura • Alta resistencia elimina la necesidad de medición a 4 hilos • Pequeños • Buena estabilidad	• Buena linealidad • Barato
DESVENTAJAS			
• No lineal • Baja tensión • Requiere compensación por unión de ref. • Baja sensibilidad • Relativamente baja estabilidad	• Sensible a vibraciones y golpes • Tiempo de respuesta relativamente lento • Requiere fuente de corriente • Cambios pequeños de Resistencia • Medición a 4 hilos	• No lineal • Requiere fuente de corriente • Alcance de temperatura limitado • Frágil	• Temperaturas < 250° C • Requiere alimentación • Tiempo de respuesta lenta • Configuraciones limitadas

Anexo 4.**Características del Microcontrolador PIC18LF4620**

- 64k de memoria flash y 1024 bytes de memoria de programa.
- Cuatro temporizadores de 8 y 16 bits.
- Comunicación serie RS232, RS485.
- Puerto Serie Sincrónico con 2 modos de operación: SPI y I²C.
- Puerto Paralelo Esclavo.
- Programación con bajo y alto voltaje.
- Requiere una fuente de alimentación simple de 5 V DC y 50 mA, la fuente de reloj puede ser externa o interna en el caso de una fuente externa soporta hasta 40Mhz.
- 36 pines configurables como entradas o salidas digitales.
- 13 pines configurables como conversor Analógico/Digital de 10 bits.
- Dispone de 3 fuentes de interrupciones externas.

Anexo 5.

XIII

Características de los sensores inteligentes *SHT75*

- Salida digital completamente calibrada.
- Emplean tecnología CMOS garantizando la fiabilidad y buena estabilidad térmica, así como muy bajo consumo de energía.
- El máximo error en la medición de temperatura es de ± 1 °C y en el caso de la humedad relativa es de ± 3 %.
- El Rango de trabajo para los sensores es de - 40 a 123 °C para la temperatura y de 0 a 100 % para la humedad relativa.

Tabla 4.1. Datos característicos del sensor SHT75.



	Humedad Relativa		Temperatura	
Parámetro	Tip.	U	Tip.	U
Resolución	0.05	%RH	0.01	°C
Precisión	± 3	%RH	± 1.3	°C
Repetibilidad	± 0.1	%RH	± 0.1	°C
Histéresis	± 1	%RH	--	
Rango de trabajo	0-100	%RH	-40 - 123.8	°C
Deriva térmica	<0.5	%RH/yr	<0.04	°C/yr

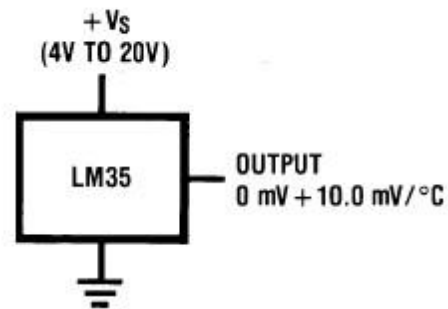
Tabla 4.2. Comandos para el manejo del sensor SHT75.

Comando	Código
Medición de temperatura	00011
Medición de humedad	00101
Leer registro de estado	00111
Escribir registro de estado	00110
Reset	11110

Anexo 6.

XIV

Características del sensor analógico LM35

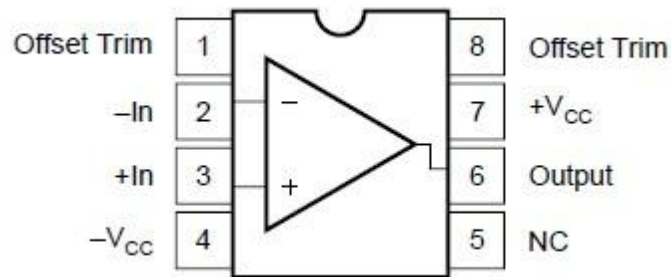


- **Sensor de temperatura LM35A.**
- $T_{max} = 150^{\circ}C$
- Voltaje de operación: $1.2 - 30 V$
- Coeficiente del error de ganancia $K_G = \pm 0.2 mV/^{\circ}C$
- Error de no linealidad $\Delta NL = \pm 0.5^{\circ}C$
- Error por regulación de la carga $E_{RL} = \pm 0.2 mV/V$
- Resistencia térmica $\emptyset = 120^{\circ}C/W$
- Corriente de consumo $I_{Disp} = 138\mu A$ para una temperatura de $98^{\circ}C$.

Anexo 7.

XV

Características del amplificador operacional OPA27



- Rango de temperatura de operación: 0 a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Entrada diferencial de voltaje: $\pm 22\text{V}$.
- Rango de voltaje de entrada: $\pm 15\text{V}$.
- Alta impedancia de entrada.
- Tensión de desplazamiento $e_d = \pm 100\mu\text{V}$.
- Deriva térmica $T_{ked} = 1.8\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- Diferencia de las corrientes de entradas: 75 nA .
- Consumo de corriente: $I_D = 5.7\text{mA}$.
- Resistencia térmica $\emptyset = 90\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

Anexo 8.

XVI

Características de la celda calibrada BP Solar



- ✓ Sensibilidad $S_{CBP} = 47 \mu V / \frac{W}{m^2}$
- ✓ Precisión $\pm 0.21 \%$.

Figura 7.1. Celda Solar.

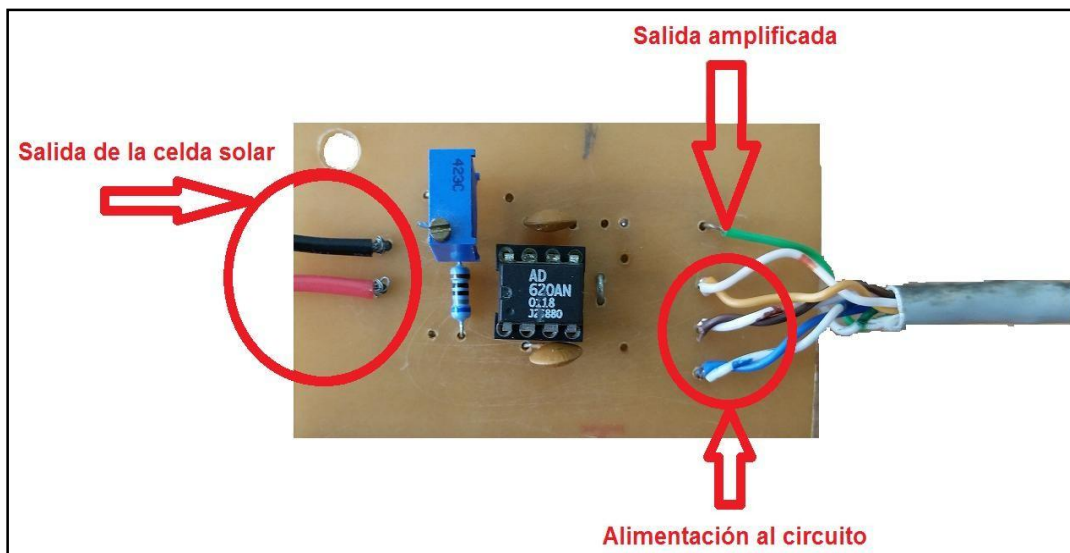
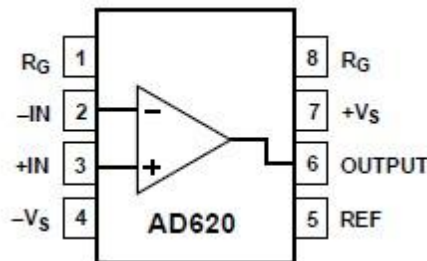


Figura 7.2. Foto del circuito de acondicionamiento de la celda solar.

Anexo 9.

XVII

Características del amplificador de instrumentación AD620



- ✓ Alta impedancia de entrada 10 GΩ.
- ✓ Rechazo al modo común CMRR: 100 dB min para G= 10.
- ✓ Ganancia seleccionable de forma externa por resistencia: 1-1000.
- ✓ Bajo voltaje de OFFSET: 50 μV max.
- ✓ Amplio rango de alimentación desde ±2.3V a ±18V.
- ✓ Corriente de consumo $I_{Inst} = 1.3mA$.
- ✓ Voltaje de offset y deriva térmica,

$$e_{dl} = 15\mu V + 0.1 \cdot \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot \Delta T + \frac{200\mu V + 2.5 \frac{\mu V}{^{\circ}C} \cdot \Delta T}{G}$$
- ✓ Temperatura de operación: -40 °C a 85 °C.
- ✓ Resistencia térmica $\emptyset = 90^{\circ}C/W$.

Anexo 9. Esquema eléctrico general de la tarjeta de adquisición y control

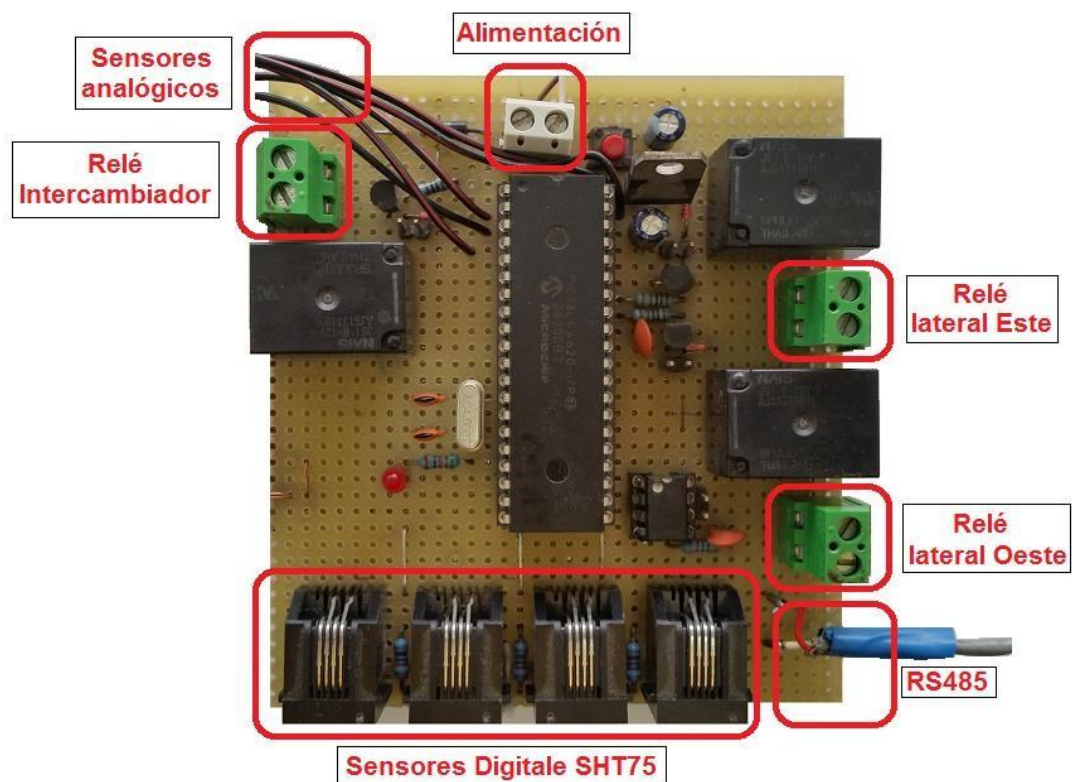
Anexo 10. Imagen de la tarjeta de adquisición y control

Figura 10.3. Imagen de la tarjeta de adquisición y control.