



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR

TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

“DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO EN
TIEMPO REAL DE UN SECADOR SOLAR MIXTO CON MATERIAL DE
CAMBIO DE FASE, PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA (FIQ)”

Autores:

Jocsan Haniel Castillo Carranza

Sergio Marcelo Zepeda Irigoyen

Tutor:

Ing. Álvaro Antonio Gaitán

Mayo 2022

Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por habernos dado la vida y permitirnos el haber llegado hasta este momento tan importante de nuestra formación profesional.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, por ser un pilar fundamental y habernos apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

A nuestro Tutor, Ing. Álvaro Gaitán, por haber sido un guía excelente, quien con sus conocimientos y consejos nos ha acompañado en la realización de este trabajo monográfico.

Así mismo, deseamos expresar nuestro reconocimiento al Ing. Ricardo Jarquín por todas las atenciones e información brindada a lo largo de esta indagación.

Agradecemos a todos los docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarnos como profesional.

RESUMEN

La actividad agrícola sostiene gran parte de la economía nicaragüense, no obstante, los procesos utilizados en el país para el tratamiento de la humedad de los granos y ciertos productos son ineficientes, causando que la cosecha se pierda por putrefacción o germinación, por lo tanto, la Facultad de Ingeniería Química desarrolló un secador solar mixto con material de cambio de fase para determinar su efectividad, tomando muestras de la temperatura, humedad relativa y flujo de aire en distintos puntos del secador.

Debido a la cantidad de sensores y que las muestras deben tomarse durante 4 días sin interrupciones, se optó por desarrollar un sistema de medición y almacenamiento para el monitoreo de estas variables. El diseño de este sistema se compone por un subsistema de adquisición de datos y uno de control y almacenamiento utilizando un microcontrolador ATMEGA328P, además de utilizar módulos Xbee. Se implementó una interfaz de usuario para el control del sistema y la selección del tiempo de muestreo. Los datos de los sensores son exportados a Excel con hora y fecha en que la muestra fue tomada para que posteriormente la Facultad de Ingeniería Química pueda proceder con el análisis de estos.

En este informe se presentan los aspectos más relevantes para el diseño e implementación del sistema, los mismos son presentados de forma tal que puedan ser fácilmente utilizados por aquellos interesados en este campo, ya sea para proyectos relacionados o mejoras del mismo.

ABSTRACT

Agricultural activity sustains a great part of the Nicaraguan economy, however, the processes used in the country to treat grain moisture and certain products are inefficient, causing the harvest to be lost due to rot or germination, therefore, The Faculty of Chemical Engineering developed a mixed solar dryer with phase change material to determine its effectiveness, taking samples of temperature, relative humidity and air flow at different points in the dryer.

Due to the number of sensors and the fact that the samples must be taken for 4 days without interruptions, it was decided to develop a measurement and storage system to monitor these variables. The design of this system is made up of a data acquisition subsystem and a control and storage subsystem using an ATMEGA328P microcontroller, in addition to using Xbee modules. An user interface for system control and sampling time selection was implemented. The data from the sensors is exported to Excel with the hour and date that the sample was taken so the Faculty of Chemical Engineering can subsequently proceed with their analysis.

This report presents the most relevant aspects for the design and implementation of the system, they are presented in such a way that it can be easily used by those who are interested in this field, either for related projects or improvements of itself.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5
I MARCO TEÓRICO.....	6
I.1 Secadores Solares.....	6
I.1.1 Tipos de Secadores	6
I.1.1.1 Secadores solares directos	6
I.1.1.2 Secadores solares indirectos	7
I.1.1.3 Secadores solares mixtos	8
I.1.1.4 Secadores solares pasivos	8
I.1.1.5 Secadores solares activos	8
I.1.1.6 Secadores solares híbridos.....	9
I.2 Partes de un secador solar mixto	9
I.2.1 Colector Solar	9
I.2.2 Cámara de secado.....	10
I.3 Almacenamiento de energía térmica.....	11
I.3.1 . Materiales de cambio de fase	11
I.4 Sistema de medición.....	11
I.4.1 Sensores	12
I.4.1.1 Sensores de temperatura.....	12
I.4.1.1.1 LM35	13

I.4.1.1.2	RTD.....	14
I.4.1.1.3	Termocuplas	15
I.4.1.1.4	Termistores	16
I.4.1.2	Sensores de Humedad.....	17
I.4.1.2.1	AM2315.....	17
I.4.2	Anemómetro.....	19
I.4.2.1	Anemómetros rotativos	19
I.4.2.2	Anemómetros Térmicos	20
I.4.2.3	Anemómetros sónicos.....	21
I.4.3	Acondicionamiento de señal	22
I.4.4	Amplificador Operacional de Instrumentación.....	23
I.4.5	Convertor Análogo-Digital	24
I.5	Unidad de procesamiento	25
I.5.1	Microcontrolador	25
I.6	Interfaz Hombre – Máquina.....	26
I.7	MySQL	26
I.8	Comunicación	27
I.8.1	I2C.....	27
I.8.2	SPI	28
I.8.3	Protocolo UART	29
I.8.4	Módulos Xbee	30
II	ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	31
II.1	Etapa de análisis.....	31
II.1.1	Desarrollo del secador por pate de la FIQ.....	32
II.1.2	Requerimientos del sistema	34

II.2	Etapa de Diseño.....	35
II.2.1	Esquema general del sistema	36
II.2.2	Sensores análogos.....	38
II.2.2.1	Sensor de Temperatura del aire en el secador	38
II.2.2.2	Sensor de temperatura de parafina y superficie.....	39
II.2.2.3	Módulo de Acondicionamiento de señal para sensor LM35	41
II.2.2.4	Módulo de Acondicionamiento de señal para RTD PT100	43
II.2.2.5	Simulación de los módulos de acondicionamiento de señal	46
II.2.2.5.1	Simulación del módulo LM35	46
II.2.2.5.2	Simulación Módulo RTD	47
II.2.2.5.3	Error por tolerancia de elementos pasivos.....	48
II.2.3	Sensores digitales	50
II.2.3.1	Anemómetro.....	50
II.2.3.2	Sensor de temperatura y humedad AM2315.....	53
II.2.4	Microcontrolador	55
II.2.4.1	Requerimientos del microcontrolador.....	55
II.2.4.2	Selección de microcontrolador	57
II.2.5	Digitalización	58
II.2.5.1	Error de cuantización del ADC	58
II.2.6	Sistema de comunicación	59
II.2.6.1	Formato de salida de datos.....	59
II.2.6.2	Requerimientos del sistema de comunicación	60
II.2.6.3	Selección del sistema de comunicación.....	60
II.2.6.4	Configuración de los módulos Xbee.....	62
II.2.7	Sistema de alimentación y respaldo.....	63

II.2.7.1	Censo de carga.....	64
II.2.7.2	Fuente alimentación DC.....	65
II.2.8	Programación del microcontrolador.....	66
II.2.9	Programación del sistema de almacenamiento.....	67
II.3	Presentación de resultados.....	69
II.3.1	Implementación de los circuitos impresos.....	69
II.3.2	Resultados Obtenidos.....	73
II.3.2.1	Pruebas de Laboratorio.....	73
II.3.2.2	Pruebas de transmisión XCTU.....	74
II.3.2.3	Pruebas en el secador.....	75
II.3.3	Costos del proyecto.....	77
	Conclusiones y Recomendaciones.....	79
	Conclusiones.....	79
	Recomendaciones.....	81
	Bibliografía.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de secadores solares.....	7
Figura 2. Elementos de un sistema de medición.....	12
Figura 3. Configuración de pines y encapsulado LM35.....	13
Figura 4. Anemómetro de 3 copas	19
Figura 5. Anemómetro de hélices.....	20
Figura 6. Anemómetro térmico	21
Figura 7. Anemómetro sónico.....	22
Figura 8. Sistema de medición	22
Figura 9. Diseño de un Amplificador Operacional de Instrumentación	24
Figura 10. Conversión análogo - digital	25
Figura 11. Configuración Bus I2C.....	27
Figura 12. Configuración Bus SPI	28
Figura 13. Partes del secador solar elaborado por la FIQ	32
Figura 14. Colector	33
Figura 15. Diagrama de bloques del proyecto	37
Figura 16. Sensor de temperatura LM35	39
Figura 17. Sensor LM35 instalado en el colector.....	39
Figura 18. Sensor RTD PT100	40
Figura 19. Sensor RTD PT100 de sonda plana.....	41

Figura 20. Topología de un amplificador no inversor.....	42
Figura 21. Puente de Wheatstone	44
Figura 22. Circuito de Acondicionamiento de señal para RTD PT100.....	46
Figura 23. Simulación circuito acondicionamiento de señal para sensor LM35..	47
Figura 24. Simulación circuito acondicionamiento de señal RTD	48
Figura 25. Dimensiones Anemómetro ERAY.....	51
Figura 26. Relación entre la velocidad medida por el anemómetro y sus revoluciones por minuto.....	52
Figura 27. Gráfico comparativo entre los datos de los anemómetros versus la fórmula matemática	53
Figura 28. Sensor AM2315.....	54
Figura 29. Diagrama de enlace punto a punto usando módulos Xbee S3B	62
Figura 30. Esquemático fuente de alimentación con reguladores de voltaje.....	65
Figura 31. Máquina de estados del microcontrolador	66
Figura 32. Pantalla de inicio de sesión del software de monitoreo	68
Figura 33. Interfaz de control y configuración.....	68
Figura 34. PCB del módulo de adquisición de los LM35	70
Figura 35. PCB módulo de adquisición de las RTD.....	71
Figura 36. PCB del microcontrolador.....	72
Figura 37. PCB de los reguladores de voltaje	73
Figura 38. Baño térmico Julabo SW23	74

Figura 39	Pruebas de comunicación con el software XCTU	75
Figura 40.	Sistema de adquisición de datos	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los materiales usados para las RTD	14
Tabla 2. Clases de RTD	15
Tabla 3. Tipos de termocuplas y sus características	16
Tabla 4. Principales características sensor de humedad AM2315	18
Tabla 5. Principales características sensor de temperatura AM2315	18
Tabla 6 Tabla comparativa de sensores de temperatura	38
Tabla 7. Análisis Worst Case módulo acondicionamiento LM35	49
Tabla 8. Análisis Worst Case módulo acondicionamiento RTD	49
Tabla 9. Principales características anemómetros ERAY	50
Tabla 10 Tabla comparativa de sensor de humedad	54
Tabla 11. Pines requeridos para selección del microcontrolador	56
Tabla 12 Tabla comparativa de microcontroladores	57
Tabla 13. Características principales del microcontrolador ATMEGA328P	58
Tabla 14. Formato de comunicación	60
Tabla 15. Características del módulo Xbee S3B	61
Tabla 16. Consumo de los componentes del sistema	64
Tabla 17. Disposición y nomenclatura de los sensores por placa	69
Tabla 18 Tabla de Costos del proyecto	78

INTRODUCCIÓN

La agricultura es uno de los pilares en la economía nicaragüense, sin embargo, los índices de productividad son muy bajos ya que no se cuentan con las tecnologías necesarias para obtener un producto de calidad (Ketelhöhn, 2012). Uno de los motivos es la ineficiente remoción de la humedad en los productos cosechados, en consecuencia, estos tienden a perderse por putrefacción o germinación. Para dar solución a esta problemática, se han desarrollado distintas alternativas, entre las cuales se encuentran los secadores solares.

La Facultad de Ingeniería Química (FIQ) se encuentra desarrollando un secador solar mixto con material de cambio de fase, el cual, se pretende tenga mayor eficiencia en casos en que la radiación solar sea nula (noche) o escasa (clima), este será evaluado por la FIQ para determinar su desempeño, para esto se requiere medir la temperatura, humedad y flujo de aire en distintos puntos del secador solar, y almacenar estos datos para su posterior análisis, esto implica que los usuarios deben estar monitoreando estos distintos parámetros, en todos los puntos del secador, cada cierto tiempo, por más de 24 horas, sin importar las condiciones climáticas, además de que existe la posibilidad de obtener datos erróneos ya que el intervalo en que se tomen las muestras entre cada punto puede variar considerablemente causando que el análisis final no muestre la verdadera eficiencia del secador solar.

Para dar una solución a esta problemática se desarrolló un sistema electrónico para poder monitorear la temperatura, humedad y flujo de aire, en los distintos puntos del secador solar, este cuenta con comunicación inalámbrica para poder transmitir los datos a una computadora, donde estos serán recibidos, procesados y almacenados en una base de datos para su posterior análisis, además de poder monitorear las variables en tiempo real y tener un control de Inicio-Fin del sistema electrónico desde una interfaz de usuario, donde solo los encargados del proyecto tienen acceso.

JUSTIFICACIÓN

En Nicaragua la principal actividad económica es la agricultura, sin embargo, en su mayoría aún es de forma artesanal, lo que impacta en el índice de productividad. Un claro ejemplo es el proceso de remoción de humedad en los productos como el café, el proceso de secado se realiza a la intemperie exponiendo directamente los granos a la radiación solar lo que afecta la calidad del producto, además el riesgo de que los productos puedan ser dañados por animales como aves y roedores, rocío o lluvia, contaminación por polvo, restos de basura.

Por tal razón es conveniente la utilización de equipos de secado en los cuales se reduce la posibilidad de contaminación o daño del material, sin embargo, los equipos de secado eléctricos aparte de su elevado costo representan un aumento significativo en los costes de producción por su consumo energético.

Es por esto que se han realizado diversas investigaciones en el aprovechamiento de la energía solar para el proceso de secado, mediante el diseño de equipos secadores que utilicen únicamente la radiación solar. Sin embargo, uno del aspecto que se ha notado en estas investigaciones es la fuerte dependencia del clima, pues el secador solo funciona en las horas de alta radiación solar.

Actualmente se está desarrollando una investigación en la Facultad de Ingeniería Química, la cual consiste en el desarrollo de un secador solar mixto, donde su característica principal es la capacidad de almacenamiento de energía, para que sea utilizada en casos de poca radiación solar como los días nublados y la noche utilizando un material de cambio de fase que es parafina. De este modo se pretenden reducir la dependencia de las condiciones climáticas que retrasan el proceso e incluso causan daños al equipo.

Dentro de los alcances de esta investigación se encuentra la evaluación del secador desarrollado, por lo que se deben realizar dos procesos que son la determinación del rendimiento térmico del colector solar; así como la eficiencia tanto del colector solar como del secador solar. Para estos análisis se necesitan grandes cantidades de mediciones de las siguientes variables, temperatura, humedad relativa y flujo de aire en distintos puntos del secador.

Sin embargo, varios dispositivos de medición de la FIQ se encuentran fuera de funcionamiento, mientras los disponibles no cuentan con funciones de almacenamiento ni comunicación inalámbrica, esto implica que una persona debe ir hasta el lugar donde está instalado el secador a tomar las mediciones y luego anotarlas.

Esto representa un gran esfuerzo físico dada la gran cantidad de puntos de medición, a esto se le suma la existencia de una diferencia de tiempo considerable entre las mediciones de los diferentes puntos, lo que hace que el intervalo de muestreo se vuelva impreciso.

Por último, como uno de los objetivos del secador es contar con la capacidad de almacenamiento se deben realizar mediciones en momentos de baja o nula radiación solar como días lluviosos y la noche. En la situación actual no se podrían realizar dichas mediciones por temas de acceso y seguridad. Lo que representa para la FIQ un obstáculo para la conclusión de la investigación.

La realización de este proyecto pretende ayudar en el proceso de evaluación del secador solar mixto, mediante el desarrollo de un sistema electrónico que se instalará de forma permanente en el secador. De modo que realice las mediciones de las variables de interés en los puntos de medición designados, en el intervalo de tiempo requerido de forma precisa e ininterrumpida las 24 horas del día.

Además, el sistema contará con la capacidad de telemetría para la obtención de información sin tener que ir hasta el lugar en que se encuentre

instalado el secador, dichos datos al ser recibidos serán almacenados en una base de datos de forma que estos siempre este disponibles para ser descargados por parte de los encargados del proyecto en la FIQ para su uso en los análisis de rendimiento y eficiencia térmica.

La información y resultados del trabajo monográfico serán puestos a disposición de la Universidad Nacional de Ingeniería, de forma que sea de utilidad al sector estudiantil que deseen ampliar en esta línea de investigación ya sea para la realización de mejoras o expandiéndose a nuevas áreas relacionadas con los conocimientos expuestos en el desarrollo del proyecto.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un sistema electrónico para el monitoreo de temperatura, humedad relativa y flujo de aire, de forma inalámbrica, en tiempo real, con interfaz gráfica y almacenamiento de datos, de un secador solar mixto con material de cambio de fase elaborado por la Facultad de Ingeniería Química.

Objetivos Específicos

1. Diseñar subsistemas de medición para la adquisición de temperatura, humedad relativa y flujo de aire en diferentes partes del secador solar mixto.
2. Realizar pruebas de funcionamiento de los subsistemas de medición mediante pruebas en el Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química.
3. Implementar un sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión y recepción de los datos, de manera fiable y rápida.
4. Elaborar un programa con interfaz gráfica para el control del sistema, el procesamiento e identificación de los datos recibidos para su almacenamiento.
5. Diseñar una base de datos donde se guardarán las mediciones para su posterior análisis por parte de la Facultad de Ingeniería Química.
6. Evaluar el funcionamiento del sistema mediante rúbricas de desempeño una vez instalado en el secador.

I MARCO TEÓRICO

I.1 Secadores Solares

Un secador solar es un equipo que aprovecha las corrientes de aire y la radiación solar como fuente de energía para remover la humedad de los alimentos. El proceso de secado solar ha venido evolucionando y los equipos de secado actuales toman en cuenta ciertos criterios para evitar el daño o contaminación del producto. Al utilizar como fuente principal de energía la radiación solar se disminuye o incluso elimina el consumo de energía convencional evitando la contaminación del medio ambiente (Delgado & Lezcano, 2020).

I.1.1 Tipos de Secadores

Los sistemas de secado solar se pueden clasificar en dos grupos como se muestra en la Figura 1, los secadores solares que tratan la energía solar y los que tratan las corrientes de aire. Los que basan su funcionamiento en el tratamiento de la energía solar se dividen en secadores solares directos, indirectos y mixtos. Y los que manejan las corrientes de aire se dividen en dos pasivos y activos.

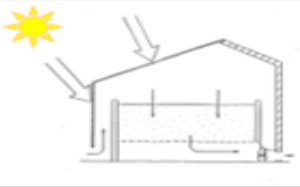
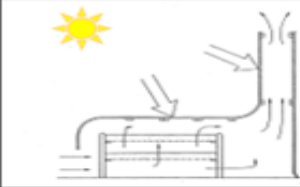
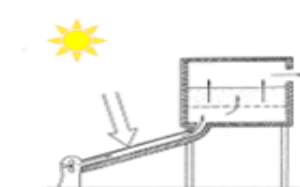
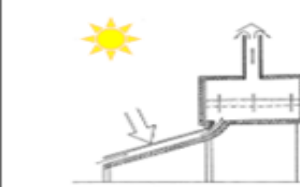
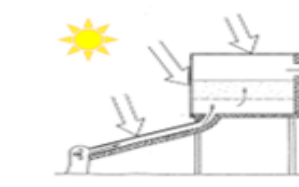
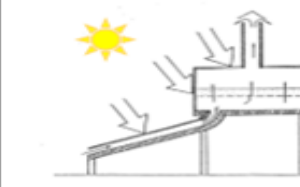
I.1.1.1 Secadores solares directos

Este tipo de secador solar hace referencia a que los rayos solares caen directamente sobre el material. De esta forma se produce un aumento en la temperatura del material causando la evaporación de la humedad.

Según Kumar y otros, (2016) los secadores solares directos los componen una cámara de sacado, la cual, en la parte superior, consta de una cubierta hecha de un material transparente. La función de este tipo de secador solar consiste en que el aire, a medida que circula por la cámara de secado, va aumentando su temperatura y humedad. Entre los secadores solares directos más conocidos están los de gabinete o armario; de tienda y tipo domo, también llamados de invernadero.

Figura 1.

Tipos de secadores solares.

Forma de utilización de la energía solar	Fuerza impulsora del movimiento del aire	
	Secadores Solares Activos	Secadores Solares Pasivos
Secadores Solares Directos		
Secadores Solares Indirectos		
Secadores Solares Mixtos		

Nota: Tomado de Diseño y Evaluación de un Secador Solar Mixto con Material de Cambio de Fase para Acumular Energía Térmica de Delgado & Lezcano, 2020.

I.1.1.2 Secadores solares indirectos

Este tipo de secadores solares, al contrario de los directos, el producto no recibe directamente los rayos solares, si no que primeramente la energía solar se utiliza para amentar la temperatura de un gas, en la mayoría de los casos aire, que circula a través de la cámara donde influye en el secado de los productos.

En Mustayen y otros, (2014) se definen y se explican las funciones de las partes principales de los secadores solares indirectos, las cuales son, un colector solar y una cámara de secado. Primeramente, el colector solar absorbe la radiación solar a través de sus partes metálicas estas transfieren la energía al aire, este se calienta y recorre la cámara de secado donde entra en contacto con el producto, secándolo y removiendo la humedad.

I.1.1.3 Secadores solares mixtos

Los secadores solares mixtos son una mezcla de los secadores solares directos e indirectos, estos utilizan el colector solar del secador indirecto y lo combinan con una cubierta superior transparente del secador directo. Esto resulta en una ventaja para el secador mixto ya que aprovecha en sus dos partes la radiación solar (Brace Research Institute, 1975)

I.1.1.4 Secadores solares pasivos

En los secadores solares pasivos el aire caliente circula a través del equipo de forma natural debido a las fuerzas de flotación o por la presión del viento o una combinación de ambas. Estos secadores son conocidos como secadores por convección natural (Prakash & Kumar, 2017). Estos secadores son los recomendados para utilizarse en zonas rurales ya que son funcionalmente superiores y económicamente más competitivos que el secado al aire libre (Ekechukwu & Norton, 1999).

I.1.1.5 Secadores solares activos

Los secadores solares activos constan de ventiladores o extractores para garantizar la circulación del aire dentro del equipo. Estos usualmente se utilizan para secar grandes cantidades de productos o con bastante humedad. También son conocidos como secadores por convección forzada (Prakash & Kumar, 2017).

La ventaja de los secadores activos sobre los secadores pasivos es que el aire circula con mayor velocidad, por lo tanto, las velocidades de transferencia de masa y de calor serán superiores. Debido a que en un secador activo circula una mayor cantidad de aire, se obtendrán mejores resultados con respecto al proceso de secado además de que se podrán procesar más productos que en un secador pasivo de igual tamaño.

I.1.1.6 Secadores solares híbridos

También existen los secadores solares híbridos, la diferencia con los secadores descritos anteriormente es que estos utilizan una fuente de energía, adicional a la que se obtiene del sol y del aire, esto para no depender exclusivamente del clima e incluso operar en la noche. Estas fuentes de energía adicional pueden ser resistencias eléctricas, quemadores de combustibles fósiles o leña (Belessiotis & Delyannis, 2011; Prakash & Kumar, 2017).

Según Delgado & Lezcano, (2020) los secadores que utilizan materiales de cambio de fase también se pueden considerar como secadores solares híbridos. Para obtener un secador solar híbrido simplemente se deben combinar estas fuentes de energía con uno de los secadores descritos anteriormente.

I.2 Partes de un secador solar mixto

Debido a que esta propuesta de proyecto se desarrollará en un secador solar mixto, a continuación, se describen brevemente las partes que lo componen.

I.2.1 Colector Solar

Como se mencionó anteriormente, el colector solar es uno de los componentes de los secadores solares mixtos, este se compone de cuatro elementos principales: cubierta transparente, absorbedor, pasaje de aire y capa aislante. Cabe mencionar, que el pasaje de aire no es un componente físico, es decir, no representa un material en específico, se le llama pasaje de aire al espacio que entre los otros tres materiales que componen el colector solar.

El objetivo principal de la cubierta es evitar la pérdida de energía entre el absorbedor y el medio ambiente. Según Ihaddadene y otros, (2014) la cubierta permite la entrada de la radiación solar incidente de onda corta; pero evita la salida de radiación térmica de onda larga.

El segundo componente de un colector solar es el absorbedor, este es el encargado de almacenar la energía solar y calentar el aire que circula dentro del

colector. El metal es el material más común utilizado para la construcción de los absorbedores (Foster, 2013).

En Ihaddadene y otros, (2014); Tiwari, (2016) se refieren a capa aislante como la parte inferior del colector solar, este puede estar construido con los mismos materiales que la estructura que soporta el colector. Su función es evitar las pérdidas de calor hacia los alrededores del colector solar.

I.2.2 Cámara de secado

Según Delgado & Lezcano, (2020) la cámara de secado es el lugar donde se coloca el producto a secar. Comúnmente la cámara de secado es de forma rectangular y está construida con paredes y un soporte.

La cámara de secado está constituida por otros elementos que cumplen ciertas funciones, uno de ellos son los ventiladores, estos se dividen en dos tipos, los de tiro natural y los de tiro mecánico. Los de tiro mecánico, la circulación del aire se debe a gradientes de temperatura, a medida que aumenta la temperatura el aire circula a la parte superior del colector solar para luego pasar a la cámara de secado que se encuentra a mayor altura que el colector, por lo tanto, las aberturas para la entrada de las corrientes de aire se encuentran en la parte inferior del colector y por donde se expulsa es en la parte superior de la cámara de secado (Enibe, 2002; Jain & Tewari, 2015) o una chimenea (Batubara y otros, 2017; Forson y otros, 2007; Foster, 2013).

Con los secadores de tiro mecánico, se hace circular el aire dentro de la cámara utilizando ventiladores (Brace Research Institute, 1975; Ezeike, 1986; Tiris y otros, 1994). Cuando el ventilador se ubica antes de la entrada del aire, es decir, el aire ambiente es impulsado hacia el equipo, el secador es de tiro mecánico forzado (Baniasadi y otros, 2017) (Pakhare & Salve, 2016) (Saxena y otros, 2013). Pero cuando el ventilador se utiliza para expulsar el aire fuera de la cámara de secado, es decir, se ubica en la parte superior de esta, se llama secador de tiro

mecánico inducido (Abderrahmane, 2015; Bergman, 2001; Brace Research Institute, 1975).

I.3 Almacenamiento de energía térmica

Para que los secadores solares no dependan exclusivamente de la radiación solar y cumplan con su función en momentos en que el clima no es favorable, almacenan energía térmica en materiales tales como agua, roca, arena, o materiales de cambio de fase. La energía térmica en secadores solares se puede almacenar como energía interna de un material ya sea en forma de calor sensible o de calor latente (Bal y otros, 2010).

Al almacenar la energía en forma de calor latente, la absorción o la liberación de dicha energía debe ser constante cuando el material sufre una transición sólido-líquido, además los cambios de volumen son menores (Agrawal & Sarviya, 2016).

I.3.1 . Materiales de cambio de fase

Cuando un material pasa de estado sólido a líquido o viceversa, se le conoce como cambio de estado o fase, cuando esto sucede, se da la transferencia de energía térmica. Los materiales de cambio de fase pueden almacenar de 5 a 14 veces más calor por unidad de volumen que otros materiales, como el agua o roca (Sharma y otros, 2009).

Según Delgado & Lezcano (2020) la parafina es el material más utilizado para el almacenamiento de energía en secadores solares debido a su accesibilidad y sus propiedades térmicas. La parafina es parte de un grupo de materiales de cambio de fase llamados orgánicos.

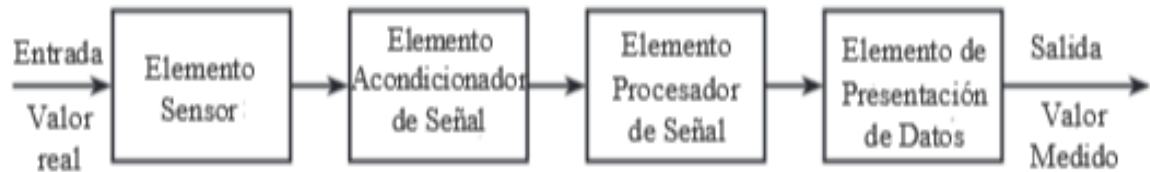
I.4 Sistema de medición

Un sistema de medición existe para proveer información acerca del valor físico de una variable de interés. En casos simples, el sistema puede consistir en un único elemento, pero generalmente consiste en varios elementos separados a

como se muestra en la Figura 2. Estos bloques pueden estar físicamente contenidos en un solo componente electrónico o pueden estar separados.

Figura 2.

Elementos de un sistema de medición.



Nota: Tomado de Sistemas de medición: Principios y aplicaciones de Bentley & Vega, 1993.

I.4.1 Sensores

El primer elemento en cualquier sistema es el sensor primario, el cual genera una salida en función del fenómeno físico bajo estudio. Muchos sensores tienen salidas lineales.

I.4.1.1 Sensores de temperatura

Para poder medir los niveles de temperatura que existen en los distintos puntos del equipo se requiere de la utilización de sensores para convertir esta magnitud física, en una variable eléctrica, la cual, podrá ser interpretada por el microcontrolador.

Debido a la diversidad de aplicaciones de los sensores de temperatura podemos encontrar una gran variedad de estos (Mayné, 2003):

- Termopares: Los termopares utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto térmico, debido a sus distintos comportamientos eléctricos.
- Semiconductores: Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente.

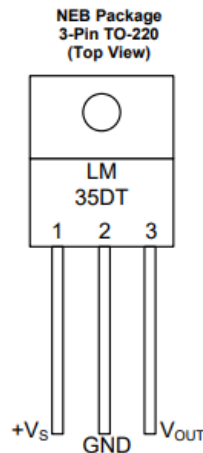
- Resistivos: Lo constituyen las RTD¹ basadas en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura, están caracterizadas por un coeficiente de resistividad positivo PTC². También lo son las NTC³, que se llaman termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo.

I.4.1.1.1 LM35

El LM35 es un sensor de temperatura que posee un rango de trabajo desde -55°C hasta +150°C. Existen distintos tipos de encapsulados para este sensor, el más común es el TO-92, el cual adopta la típica forma de un transistor con 3 pines, dos de ellos para su alimentación y la tercera nos entrega un valor de tensión proporcional a la temperatura medida por el dispositivo. Su salida es de tipo analógica y lineal con una pendiente de 10mV/°C. El sensor es calibrado de fabrica para grados Celsius con una precisión de 0.5°C. (Chero & Roman, 2013).

Figura 3.

Configuración de pines y encapsulado LM35



Nota: Tomado de LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors de Texas Instruments, 1999.

¹ Resistance Temperature Detector

² Positive Thermal Coefficient

³ Negative Thermal Coefficient

No necesita de ningún circuito adicional para ser usado. Alimentado directamente con un suministro de 5V entrega una salida analógica entre 0V a 1.5V. Este voltaje analógico puede ser leído por el ADC⁴ de un microcontrolador como PIC o Arduino. Entre sus aplicaciones podemos encontrar termómetros, termostatos, sistemas de monitoreo y más.

I.4.1.1.2 RTD

Las RTD trabajan según el principio de que a medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, la magnitud en que esta resistencia varía se puede relacionar con la variación de la temperatura. Estas son elaboradas con elementos sensitivos basados en conductores metálicos, los cuales cambian su resistencia eléctrica en función de la temperatura. (Aragonés y otros, 2003).

Comúnmente, el material utilizado para la construcción de las RTD es una resistencia de platino (Pt), llamadas también PRTD. Además del platino se utilizan otros materiales resistivos, cuyas características se describen en la Tabla 1. Generalmente poseen una resistencia entre 20 Ω ⁵ y 20K Ω y una de sus ventajas es su linealidad dentro del rango de temperatura entre -200 °C y 850 °C. (Rodríguez y otros, 2007)

Tabla 1.

Características de los materiales usados para las RTD

Material	Rango de Temperatura (°C)	Variación (% / °C) a 25 °C
Platino	-200 a 850	0.39
Níquel	-80 a 320	0.67
Cobre	-200 a 260	0.38
Níquel - Acero	-200 a 260	0.46

⁴ Analog to Digital Converter – Conversor Analógico Digital

⁵ Ohm

Nota: Adaptado de Medición de temperatura: sensores termoelectricos de Rodríguez y otros, 2007.

Las RTD se dividen en clases, las cuales determinan su precisión y rango de trabajo. En la siguiente tabla, se muestran las diferentes clases de RTD, con su precisión correspondiente y rangos de trabajo. Según la norma DIN IEC 751 existen dos clases, cuyas características se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.
Clases de RTD

	Precisión	Rango de trabajo (°C)
Clase A	± 0.15 °C	-200 a 600
Clase B	± 0.3 °C	-200 a 850

Nota: Adaptado de Sensores de temperatura de Aragonés y otros, 2003.

Las RTD pueden tener diferentes resistencias nominales, las más comunes se presentan como PT-100 y PT-1000, donde el termino PT se refiere al material utilizado, en este caso Platino, y la referencia corresponde al valor nominal de la resistencia 100Ω y 1000Ω cuando la temperatura medida equivale a 0 °C.

I.4.1.1.3 Termocuplas

Una termocupla está compuesta por la unión de dos metales distintos los cuales producen una diferencia de potencial muy pequeña (en el orden de los μV). Esta diferencia de potencial corresponde a la diferencia de temperatura entre sus extremos, los cuales se llaman punto caliente y punto frío. (Chaparro Riveros, 2018).

Este tipo de sensores se podrían clasificar tomando en cuenta varios criterios, como el material con el que están fabricados, su tolerancia, rango de trabajo, desviación, etc.

Según Aragonés, y otros, (2003), durante varios años han habido distintos organismos de estandarización, de distintas nacionalidades, que han intentado normalizar la gran variedad de este tipo de sensores e incluso unificar sus criterios de normalización.

Tabla 3.
Tipos de termocuplas y sus características

Tipo	Composición y símbolo	Rango de temperaturas	FEM⁶ en función de °C (mV)
B	PtRh 30% - PtRh 6%	0 a 1500	13.58
R	PtRh 13% - Pt	0 a 1400	20.21
S	PtRh 10% - Pt	0 a 1300	15.57
J	Fe – CuNi	-200 a 700	51.87
K	NiCr – Ni	0 a 900	48.82
T	Ci – CuNi	-200 a 700	20.86
E	NiCr - CuNi	-200 a 600	61.02

Nota: Adaptado de Sensores de temperatura de Aragonés, y otros, 2003.

I.4.1.1.4 Termistores

Los termistores están compuestos de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos, son esencialmente un semiconductor que se comporta como un resistor térmico. Existen dos tipos de termistores, si su coeficiente disminuye a medida que aumenta la temperatura, se denominan NTC, en caso contrario, si el coeficiente aumenta con respecto a la temperatura, se denominan PTC. Una de sus principales características es su no linealidad.

⁶ ϵ – Voltaje Inducido

Pueden encontrarse en el mercado termistores con valores entonces 100Ω y 30K Ω, los más comunes se encuentran en el rango de 1K Ω y 5K Ω. Comúnmente, los rangos de trabajo, en el orden de grados centígrados, se encuentran entre -50 y 200, sin embargo, hay algunos que alcanzan los 450. (Aragón y otros, 2003).

I.4.1.2 Sensores de Humedad

De acuerdo con Kouro, (2001), existen distintos tipos de sensores de humedad los cuales se diferencian en función a sus principios de funcionamiento, sensores mecánicos, bulbos húmedo y seco, por condensación, sales higroscópicas, electrolíticos, por conductividad, infrarrojos, piezoeléctricos y capacitivos.

Los sensores de humedad capacitivos son los más comunes en el ámbito de industrias y meteorología debido a su costo de producción y alta fidelidad. Su principio de funcionamiento consiste en el cambio que sufre la capacitancia de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo.

I.4.1.2.1 AM2315

El sensor AM2315 está compuesto por un sensor de humedad capacitivo y un termistor encargado de medir la temperatura, estos son controlados por un pequeño microcontrolador interno que calibra los sensores y gestiona las lecturas y las envía utilizando el protocolo de comunicación I2C⁷. Este también cuenta con un encapsulado de plástico el cual facilita su instalación y permite su sustitución en caso se dañe. En la Tabla 4 se muestran las principales características del sensor de humedad y en la Tabla 5 se muestran las principales características del sensor de temperatura.

⁷ Inter Integrated Circuits

Tabla 4.

Principales características sensor de humedad AM2315

Parámetro	Min	typ	Max	Unidad
Resolución		0.1		% HR ⁸
Rango	0		99.9	% HR
Precisión		± 2		% HR
Repetitividad		± 0.1		

Nota: Adaptado de Digital temperature and humidity sensor AM2315 Product Manual de Aosong Electronics, 2019.

Tabla 5.

Principales características sensor de temperatura AM2315

Parámetro	Min	typ	Max	Unidad
Resolución		0.1		°C
		16		bit
Rango	-40		125	°C
Precisión		± 0.2		°C
Repetitividad		± 0.2		

Nota: Adaptado de Digital temperature and humidity sensor AM2315 Product Manual de Aosong Electronics, 2019.

⁸ Porcentaje de Humedad Relativa

I.4.2 Anemómetro

La anemometría es la parte de la meteorología encargada de la medición de la velocidad o flujo del viento, para esto se hace uso de un dispositivo que deriva su nombre de ella, el Anemómetro (Kassar, 2009). Actualmente existen distintos tipos de anemómetros para la medición de la velocidad o flujo del viento entre los cuales se encuentran los anemómetros rotativos, térmicos y sónicos.

I.4.2.1 Anemómetros rotativos

Este tipo de anemómetro es uno de los utilizados con mayor frecuencia, cuentan con un componente rotatorio o rotor, el cual gira de forma proporcional a la velocidad del viento cuando esté actúa sobre el instrumento. Además, pueden clasificarse en anemómetros de copa y anemómetros de hélice.

Los anemómetros de copa, Figura 4, consisten por lo general de 3 copas que rotan alrededor de un eje, este eje está ubicado de forma perpendicular a la dirección del viento. El viento incide sobre las copas y genera una diferencia de presión entre el lado cóncavo y el lado convexo, esto causa que rote desde el lado convexo hacia el lado cóncavo de la copa adyacente. (Castillo & Johanning, 2016).

Figura 4.

Anemómetro de 3 copas



Nota: Tomado de Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural de Castillo & Johanning, 2016.

Los anemómetros de hélice son similares a los anemómetros de copa, sin embargo, el eje del rotor se encuentra instalado de forma paralela a la dirección del viento y en lugar de utilizar copas, utilizan hélices. (Castillo & Johanning, 2016).

Figura 5.

Anemómetro de hélices



Nota: Tomado de Diseño e implementación de un túnel de viento de circuito abierto para una mejor exactitud en la calibración de anemómetros de Ludeña, 2019.

I.4.2.2 Anemómetros Térmicos

El funcionamiento de estos anemómetros consiste fundamentalmente de un pequeño filamento de material conductor, el cual actúa como sensor de flujo y cuyo principio se basa en la transferencia de calor. (Echavarría, 2007).

Este filamento se enfría ligeramente al ser expuesto al viento, este enfriamiento produce un cambio en la resistencia del metal, esto permite calcular la velocidad del viento ya que existe una relación entre la resistencia del metal y la velocidad del viento. Debido a que el sensor de estos anemómetros es pequeño, son ideales para medir la velocidad del viento en espacios confinados. (Castillo & Johanning, 2016).

Figura 6.
Anemómetro térmico



Nota: Tomado de Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural; Castillo & Johanning, 2016.

I.4.2.3 Anemómetros sónicos

Estos anemómetros cuentan con dispositivos transmisores y receptores de ondas ultrasónicas. Las señales son enviadas entre los dispositivos y se mide su tiempo de propagación, la velocidad en que se transmiten estas ondas varía en función de la velocidad del viento, por lo que es posible obtener una relación entre velocidad del viento y tiempo de propagación. (Castillo & Johanning, 2016).

Estas señales ultrasónicas son pulsos de aproximadamente 100KHz enviados por transductores, que en los modelos actuales de anemómetros actúan como transmisores y receptores. Comúnmente estos transductores están enfrentados entre sí, como se muestra en la Figura 7. (Jaén, 2013).

Figura 7.
Anemómetro sónico



Nota: Tomado de Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural; de Castillo & Johanning, 2016.

I.4.3 Acondicionamiento de señal

Según, Pallás, (2003), los acondicionadores de señal son los elementos del sistema de medición que toman la señal de salida entregada por un sensor y la convierten a una señal que puede ser presentada, registrada o simplemente permita su posterior procesamiento mediante un equipo o instrumento estándar. Los elementos de un sistema de acondicionamiento de señal normalmente están compuestos por circuitos electrónicos que ofrecen distintas funciones y que se requerirá de su uso según sea necesario.

Figura 8.
Sistema de medición



Nota: Tomado de Sensores y actuadores; Corona, de Abarca, & Carreño, 2014.

Entre los procesos de un sistema de acondicionamiento de señal se encuentran:

- **Amplificación:** es el proceso de aumentar “A”⁹ veces la magnitud de una señal.
- **Filtrado:** consiste en discriminar o desprestigiar componentes no deseados en una señal de interés.
- **Conversión:** un ejemplo claro de conversión es cuando se obtiene una señal analógica, pero para ser procesada se requiere en forma digital. Existen distintos tipos de convertidores de señal, tales como analógico-digital, frecuencia-voltaje, directa-alterna y viceversa.

I.4.4 Amplificador Operacional de Instrumentación

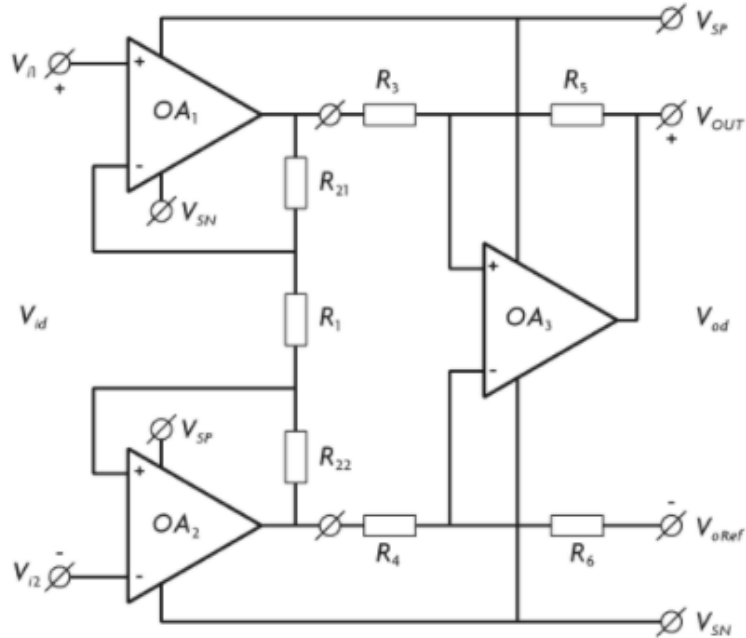
El amplificador operacional de instrumentación es un circuito diseñado para aplicaciones donde se requiere medir pequeñas variaciones de voltaje en presencia de ruido. Un ejemplo de la aplicación de los amplificadores operaciones es la medición de voltaje de salida de un circuito de puente. Estos se adquieren como circuitos integrados, como el AD620, o se puede implementar uno propio con un arreglo de circuitos operacionales no inversores y diferenciales. (Corona y otros, 2014).

Una de las diferencias de estos amplificadores con respecto a los amplificadores operaciones es que no puede ser reconfigurado, el único cambio configurable es la ganancia, la cual se limita a un rango específico, esta ganancia puede ser configurada aplicando una resistencia a uno de los pines del integrado. Además, el voltaje de salida esta referenciado a un voltaje, denominado voltaje de referencia, el cual se puede configurar dentro del rango permitido del integrado.

⁹ Ganancia de un amplificador

Figura 9.

Diseño de un Amplificador Operacional de Instrumentación



Nota: Tomado de Sensores y actuadores; Corona y otros, 2014.

I.4.5 Conversor Análogo-Digital

Un transductor nos permite interpretar las señales del mundo real y convertirlas a señales análogas eléctricas. Para que un sistema digital pueda procesar estas señales se requiere del uso de convertidores de datos del tipo ADC¹⁰ o DAC¹¹, según corresponda. En la Figura 10 se muestra el proceso desde que una variable física es captada por un sistema hasta que es transformada a señal digital.

La señal de interés se muestrea, es decir, se toman valores discretos en distintos instantes de tiempo de la señal análoga, esto recibe el nombre de “sampling”. Para garantizar que la toma de muestra y la conversión se realice de forma correcta se debe considerar la velocidad de muestreo tomando en cuenta

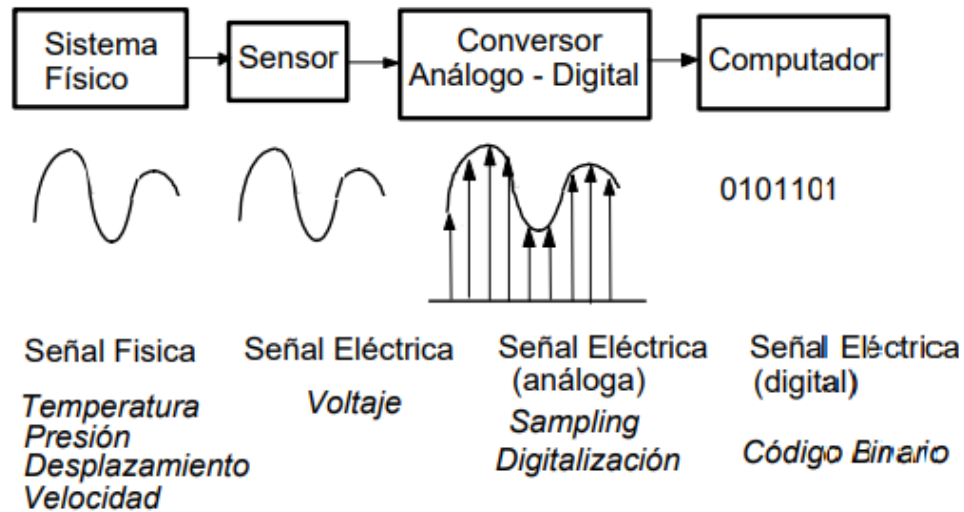
¹⁰ Analogue to Digital Converter

¹¹ Digital to Analogue Converter

el Teorema de Nyquist, el cual establece que la frecuencia de muestreo debe ser, como mínimo el doble del ancho de banda de la señal muestreada, de lo contrario se tiene lugar al fenómeno denominado “aliasing”. (Huircán, 2007).

Existen distintos tipos de arquitecturas de ADC, de aproximaciones sucesivas, flash o paralelo, integrador o de rampa, sigma – delta; los principales requerimientos a tomar en cuenta para seleccionar determinado tipo de convertidor se resume en la velocidad de muestreo deseada y resolución. (Corona y otros, 2014).

Figura 10.
Conversión análogo - digital



Nota: Tomado de Convertidores Análogo-Digital y Digital-Análogo: Conceptos Básicos; de Huircán, 2007.

I.5 Unidad de procesamiento

I.5.1 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene todos los elementos de un procesador digital secuencial síncrono programable de arquitectura Harvard o Von Neumann, básicamente en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM),

puertos de entrada. Por su tamaño los microcontroladores permiten empotrar un procesador programable en muchos productos industriales, su coste reducido y su consumo de energía y velocidad adaptables resulta apropiado para numerosas aplicaciones en las áreas de control y comunicaciones. (Pérez E. M., 2007).

Los microcontroladores están concebidos fundamentalmente para ser utilizados en aplicaciones puntuales. Es decir, aplicaciones donde el controlador debe realizar un pequeño número de tareas, el microcontrolador ejecuta un programa almacenado permanentemente en su memoria. (Valdés & Pallas, 2007).

I.6 Interfaz Hombre – Máquina

Se conoce como Interfaz Hombre – Máquina, por sus siglas en inglés HMI¹², a la interacción entre los seres humanos y una máquina utilizando un medio o interfaz, siendo capaces de transmitir mutuamente tanto información, órdenes y datos, según sea el diseño de esta. (Rodríguez P. , 2006).

Según Rodríguez P. , (2006), al diseñar una HMI se debe tener en cuenta las habilidades cognitivas y de percepción de las personas y adaptar el programa a ellas. De esta manera se establecen tres puntos importantes para el diseño de interfaces, dar control al usuario, reducir la carga de memoria del usuario y consistencia.

I.7 MySQL

MySQL es un sistema de administración de bases de datos relacionales flexible, rápido y sólido. Cuenta con licencia pública y está desarrollado en C y C++, lo que facilita su integración con otras aplicaciones desarrolladas igualmente en estos lenguajes. Utiliza el lenguaje SQL¹³ (Lenguaje de Consulta Estructurado) que es el lenguaje de consulta más usado y estandarizado para acceder a bases de datos relacionales. Se puede utilizar en distintas plataformas informáticas como

¹² Human Machine Interface

¹³ Structured Query Language

Microsoft Windows, Mac X, UNIX y las distribuciones más utilizadas de Linux. (Cobo y otros, 2005).

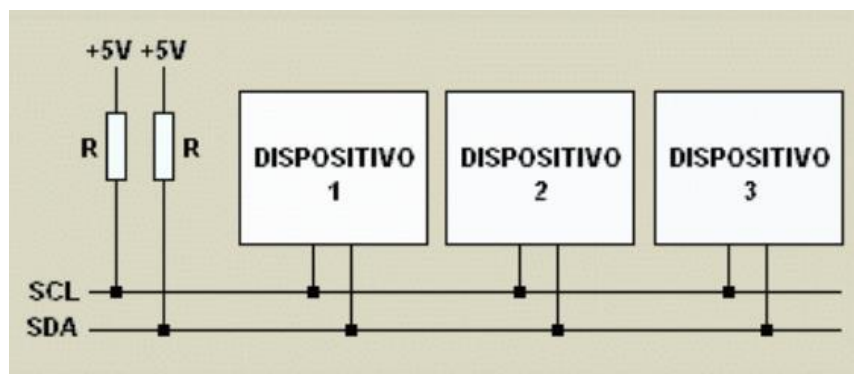
I.8 Comunicación

El prototipo debe de contar con la capacidad de comunicarse con el servidor para poder transmitir los datos obtenidos, además de que ciertos circuitos integrados tienen la característica de comunicarse con el microcontrolador utilizando diferentes protocolos de comunicación. La comunicación se puede establecer de dos formas: Cableada o inalámbrica.

I.8.1 I2C

El bus I2C, fue diseñado por Philips en 1992, es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores y otros dispositivos electrónicos, este solo requiere dos líneas, una para la sincronización de reloj (SCL) y otra para la transmisión de datos (SDA) (Díaz, 2015). Trabaja a una velocidad de 100 Kbps, aunque hay otros capaces de alcanzar velocidades de 3.4 Mbps. Los dispositivos conectados al bus pueden ser maestros o esclavos y pueden intercambiar el rol de maestro entre los distintos dispositivos que lo permitan. Debido a que a comunicación se realiza utilizando solo una línea la comunicación es semi-duplex. (Carletti, 2007).

Figura 11.
Configuración Bus I2C



Nota: Tomado de Comunicación - Bus I2C; de Carletti, 2007.

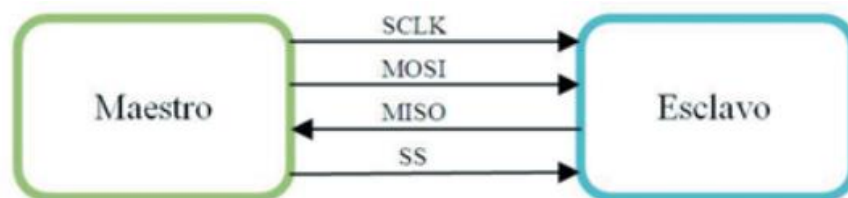
I.8.2 SPI

El bus SPI es un estándar de comunicación síncrono desarrollado por Motorola para la transmisión de datos entre dispositivos electrónicos, el tipo de comunicación es full-duplex y se realiza a través de un dispositivo que trabaja como maestro y los demás dispositivos como esclavos. (Díaz, 2015).

Según Rojas y otros, (2011) estándar hace uso de cuatro líneas para llevar a cabo la comunicación entre sus dispositivos:

- SCLK: Es la señal de reloj que se emplea para sincronizar los datos que se transmiten y reciben.
- MOSI¹⁴: Esta señal está configurada para que el dispositivo maestro transmita datos y el dispositivo esclavo reciba datos.
- MISO¹⁵: Esta señal está configurada para que el dispositivo maestro reciba datos y el dispositivo esclavo transmita datos.
- SS¹⁶: Mediante esta línea el dispositivo maestro selecciona el dispositivo esclavo con el que va a establecer la comunicación.

Figura 12.
Configuración Bus SPI



Nota: Tomado de Usando el protocolo de comunicación serial síncrono SPI en la implementación de instrumentación digital; de Rojas y otros, 2011.

¹⁴ Master Output Slave Input

¹⁵ Master Input Slave Output

¹⁶ Chip Select

I.8.3 Protocolo UART

UART, son las siglas en inglés de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, en español: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, es el dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie. Se encuentra integrado en la placa base o en la tarjeta adaptadora del dispositivo.

El controlador del UART es el componente clave del subsistema de comunicaciones series de una computadora. El UART toma bytes de datos y transmite los bits individuales de forma secuencial. En el destino, un segundo UART reensambla los bits en bytes completos.

La transmisión serie de la información digital (bits) a través de un cable único u otros medios es mucho más efectiva en cuanto a costo que la transmisión en paralelo a través de múltiples cables. Se utiliza un UART para convertir la información transmitida entre su forma secuencial y paralela en cada terminal de enlace. Cada UART contiene un registro de desplazamiento que es el método fundamental de conversión entre las forma secuencial y paralela.

Según Díaz, (2015) la principal característica de la comunicación UART es que no requiere que los dispositivos transmisor y emisor compartan la misma señal de reloj, esto conlleva a que cada dispositivo incorpora su propio reloj. Debido a que la comunicación se puede iniciar en cualquier momento se debe configurar una velocidad de transmisión de datos o baud rate. La comunicación se realiza a través de dos líneas, una de transmisión, TX, y otra de recepción, RX. Un paquete de datos está compuesto por los siguientes bits:

- Bit de start: es el bit encargado de indicar el inicio de la comunicación.
- Bits de datos: estos bits componen la información a transmitir.
- Bit de paridad: se utiliza para la detección de errores en la transmisión. Se puede emplear tanto paridad par como impar. Si al

sumar los bits en el receptor no se obtiene la paridad elegida, los datos recibidos no corresponden a los datos transmitidos.

- Bit de stop: este bit determina la finalización de la transmisión.

I.8.4 Módulos Xbee

Los módulos XBee son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Estos módulos utilizan el protocolo de red llamado Zigbee (IEEE 802.15.4) para crear redes POINT-TO-MULTIPOINT (punto a multipunto); o para redes PEER-TO-PEER (punto a punto). La familia de módulos Xbee aprovechan múltiples protocolos inalámbricos que son adecuados para todo tipo de arquitecturas de red diferentes en dependencia de la aplicación a utilizar. Estos protocolos se pueden agrupar en dos categorías: "punto a multipunto" y "redes de malla". (Digi International, 2017).

Los módulos XBee operan generalmente a 2.4 GHz, pero existen versiones que operan a 868 MHz y 900 MHz. Las dos versiones de menor frecuencia son diseñadas para que tengan una cobertura muy amplia por lo que consumen mayor potencia y se conocen como módulos Xbee pro. (Digi International, 2017).

II ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con el diseño e implementación del sistema, además se describe la metodología adoptada, pruebas y resultados obtenidos en la implementación del proyecto.

La investigación por realizar es del tipo aplicada debido a que su propósito principal la búsqueda de solución de un problema práctico, utilizando los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera. El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de medición para el monitoreo de diferentes variables como son temperatura, humedad y flujo de aire con comunicación inalámbrica, interfaz gráfica y almacenamiento de datos, que será instalado en un secador solar mixto con material de cambio de fase perteneciente a la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), el conocimiento de estas variables en diferentes partes del secador y durante el periodo de muestreo requerido permitirá a los encargados del proyecto de dicha facultad realizar la evaluación y determinar la eficiencia del secador.

La metodología a utilizar es del tipo inductiva ya que el sistema desarrollado parte de subsistemas tales como medición, acondicionamiento de señal, comunicación, procesamiento y almacenamiento de datos. Estos subsistemas son diseñados, desarrollados y puestos a prueba en ambientes controlados y así comprobar su correcto funcionamiento para luego proceder a su instalación en el secador solar unificando todos los subsistemas y conformar uno solo el cual cumpla con los requerimientos planteados.

II.1 Etapa de análisis

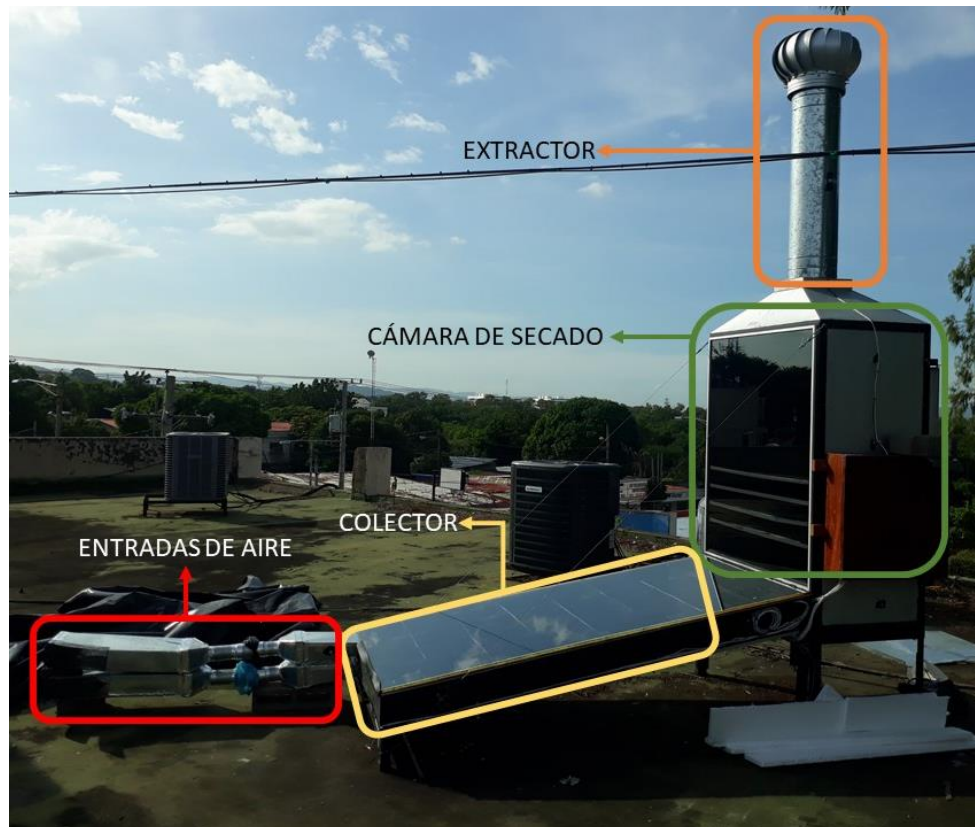
En esta etapa se realiza una breve descripción de la problemática presente que llevó a los autores al desarrollo de este proyecto, además de plantear cuáles son los requerimientos que debe cumplir el sistema a desarrollar, en base a la revisión de literatura y entrevista con los interesados.

II.1.1 Desarrollo del secador por parte de la FIQ

El diseño del secador fue llevado a cabo por la FIQ, el cual consiste en un Secador Solar Mixto por convección y con material de cambio de fase. Como se mencionó en el capítulo anterior, los secadores solares mixtos, reciben la radiación solar directamente en el colector y la cámara de secado; se consideran activos o por convección cuando se emplean ventiladores o extractores para asegurar la circulación de aire dentro del equipo; y debido a que cuenta con parafina como material de cambio de fase, este se puede considerar como híbrido, ya que utiliza una fuente de energía auxiliar para mejorar su funcionamiento cuando la radiación solar es escasa (clima) o nula (noche). En la Figura 13 se muestran las partes, antes mencionadas, del secador diseñado por la FIQ.

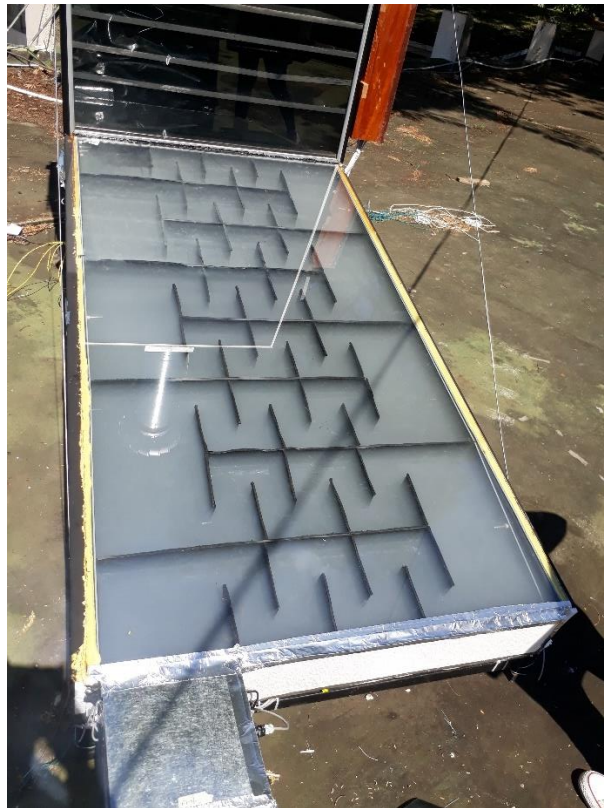
Figura 13.

Partes del secador solar elaborado por la FIQ



El colector cuenta con deflectores longitudinales y transversales con pasajes de aire por encima y debajo del absorbedor con una cubierta de vidrio encima, como se muestra en la Figura 14; las bases del secador y el acople con la cámara de secado son de metal.

Figura 14.
Colector



El absorbedor en su interior cuenta con parafina, este se extiende por todo el colector, hasta llegar a la cámara de secado, donde el flujo de aire de la parte superior e inferior del colector ingresa y se distribuye hasta salir por la parte superior (chimenea) que cuenta con un extractor.

Para que la FIQ pueda llevar a cabo la evaluación del secador es necesario grandes cantidades de mediciones de temperatura, humedad relativa y flujo de aire en los distintos puntos del secador. Sin embargo, en los laboratorios de la FIQ los equipos de medición no se encuentran en funcionamiento y los que están

disponibles no cuentan con almacenamiento, por lo que al momento de realizar las mediciones se deben tomar notas de estas.

Estas mediciones se deben realizar en todos los puntos de interés y de forma continua por 4 días. Además, se deben realizar de forma periódica y tomar en cuenta otros factores, como, la fecha y hora en que se realizó la muestra.

II.1.2 Requerimientos del sistema

Se planteó el desarrollo de este proyecto al Ing. Álvaro Gaitán, donde se establecían los requerimientos generales del sistema¹⁷. Luego, se coordinó una reunión con la FIQ¹⁸, para poder establecer los criterios de desempeño del sistema a desarrollar, donde se llegó a los siguientes acuerdos:

- Para el monitoreo de la temperatura del aire que circula en el colector y cámara de secado, se requiere de un rango de medición en 0 °C a 100 °C con una precisión de 0.5 °C
- Se requiere medir la temperatura y humedad relativa en la entrada de aire del secador y en la salida de aire en el extractor. El rango de trabajo para la temperatura deber ser de 0 °C a 100 °C y para la humedad relativa 0 a 99.
- Se debe medir el flujo del aire en las entradas del secador y mostrar los datos medidos en metros sobre segundos.
- Debido a la cantidad de sensores a monitorear, se requiere del uso de ADC externos, esto para no saturar el uso de la memoria del microcontrolador y lograr cubrir la demanda de canales ADC.
- Para el control y monitoreo del sistema en general, se utilizará una PC, la cual estará instalada en el Laboratorio de Procesos de la FIQ, esta tendrá instalados los softwares necesarios para el control del sistema, almacenamiento y visualización de los datos.

¹⁷ Anexo A. Carta de propuesta del proyecto

¹⁸ Anexo B. Acta de requerimientos

- Desde el software para el control del Sistema de Adquisición de datos, se debe contar con opciones para Iniciar y Detener el proceso de medición. Además, de poder escoger el periodo de muestro entre distintas opciones preprogramadas.
- Los datos medidos se deben guardar con Hora y fecha, además de poder exportar o visualizarlos en Excel para su posterior evaluación.
- Debido a que el secador estará instalado a la intemperie, el gabinete donde se instalaran los módulos no debe filtrar humedad, ya que podría dañar los equipos, además, debe ser un material que no interfiera con la comunicación entre los subsistemas.

En el apartado de Anexos se muestran figuras con diferentes vistas del secador solar¹⁹, de igual manera se muestran unos planos²⁰ con la ubicación de

Anexo A. ¹⁹ Anexo C. ACTA DE REQUERIMIENTOS

Managua, viernes 15 de noviembre del 2019

Se propuso la realización de un trabajo monográfico en el campo de Electrónica en asociación con un tema monográfico de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), llamado “Diseño y Evaluación de un Secador Solar Mixto con Material de Cambio de Fase para Acumular Energía Térmica”, dentro de los alcances de esta investigación se encuentra la evaluación del secador desarrollado, por lo que se deben obtener mediciones de temperatura, humedad relativa y flujo de aire en 23 puntos del secador, por al menos 4 días para su posterior análisis. Debido a esto, los bachilleres Sergio Marcelo Zepeda Irigoyen, con carné 2013-61975 y Jocsan Haniel Castillo Carranza, con carné 2013-60953, de la Facultad de Electrotecnia y Computación (FEC) propusieron el “Desarrollo de un sistema Electrónico para el monitoreo en tiempo real de un secador solar mixto con material de cambio de fase, para la Facultad de Ingeniería Química (FIQ)”, este se debe regir bajo los siguientes parámetros:

1. Los sensores dedicados a medir la temperatura del aire en el secador deben tener un rango de trabajo que comprenda los 0 °C a 100 °C con una precisión de 0.5 °C.
2. Se debe medir la temperatura y humedad relativa a la entrada y salida de aire del secador. El rango de trabajo para la temperatura debe ser de 0 °C a 100 °C y la humedad relativa de 0 a 99.
3. Se debe medir el flujo de aire en las entradas del secador y mostrar los datos obtenidos en metros sobre segundos.

-
4. Debido a la cantidad de sensores a utilizar se requiere el uso de ADC externos para cubrir la demanda de canales ADC y reducir el uso de recursos del microcontrolador.
 5. Para el control del sistema, almacenamiento y visualización de datos se utilizará una PC instalada en el Laboratorio de Procesos de la FIQ.
 6. La PC donde se almacenarán los datos debe contar con una interfaz de usuario para dar inicio y detener el proceso de medición. Además de poder establecer el tiempo de muestreo mediante las siguientes opciones preprogramadas: 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 segundos.
 7. Los datos de las mediciones se deben guardar con la fecha y hora que la muestra fue tomada.
 8. Los datos se deben poder exportar a Microsoft Excel para su posterior análisis.
 9. El gabinete donde se instalarán los equipos en el secador no debe filtrar humedad y que no interfiera con la comunicación entre los equipos.

Sin más asuntos que tratar.

Br. Sergio Marcelo Zepeda

Estudiante FEC

Br. Jocsan Haniel Castillo

Estudiante FEC

los sensores representados por una notación numérica y en el Anexo E²¹ se describe el significado cada notación, indicando el tipo de sensor a utilizar y asignándoles nombres para poder identificarlos.

II.2 Etapa de Diseño

En este apartado se explica el proceso que se realizó para el diseño del sistema comenzando con un esquema general y luego describiendo cada uno de los bloques de este. Observando un orden secuencial similar al que sigue la señal física desde el momento en el que se adquiere hasta el momento en que se visualiza.

De forma paralela a la explicación del diseño se abordarán análisis teóricos con el fin de mostrar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

II.2.1 Esquema general del sistema

El proyecto desarrollado, se puede observar cómo dos módulos. El sistema de adquisición de datos, el cual se instaló en el secador y el sistema de control y almacenamiento. Este último controla el sistema de adquisición de datos, le solicita la realización de las mediciones y el envío de dicha información, a este también llegan todos los datos para ser procesados y almacenados con el fin de ser usados posteriormente en la evaluación del secador solar.

Br. Tania Lisbeth Delgado

Estudiante FIQ

Br. Janella Lisseth Lezcano

Estudiante FIQ

Vistas del Secador Solar

²⁰ Anexo D. Planos de la ubicación de los sensores

²¹ Anexo E. Descripción de los sensores

Para el caso del sistema adquisición de datos, el sistema diseñado tiene como objetivo permitir realizar mediciones de las diferentes variables, temperatura, humedad relativa y flujo de aire, en los puntos indicados en la etapa de análisis.

Este consta de cuatro tipos de sensores de temperatura. El primer tipo para medir la temperatura del aire en el secador, el segundo para monitorear la temperatura de la parafina (material de cambio de fase) en el colector y la cámara de secado. El tercer tipo son sensores de temperaturas de forma plana, diseñados para poder medir la temperatura superficial, estos fueron usados para medir la temperatura en distintos puntos de la superficie del colector. Por último, un cuarto tipo son sensores de temperatura y humedad que deben ser instalados a la entrada de aire en el colector y la salida, en el extractor. Mientras los 3 primeros sensores citados son analógicos es decir proporcionan una variación del tipo eléctrica en forma de voltaje en relación con la temperatura, este último sensor brinda los valores de humedad y temperatura de forma digital usando el protocolo I2C.

Debido a que se debe poder medir el flujo de aire a la entrada del colector se deben usar anemómetros para medir el flujo de aire. Este tipo de sensor es de tipo óptico brindando una serie de pulsos cuadrado a su salida.

Para el caso de los sensores analógicos su salida es acondicionada utilizando diferentes modelos de circuitos acondicionadores de señal con el fin de entregarla de la mejor manera posible a los ADC y de esta manera tener una mayor precisión en los datos obtenidos. Dada la gran cantidad de sensores que se utilizan, se hace uso de ADC externos con comunicación SPI, de tal forma que se reduzca el uso de pines en el microcontrolador, como también el uso de recursos del mismo.

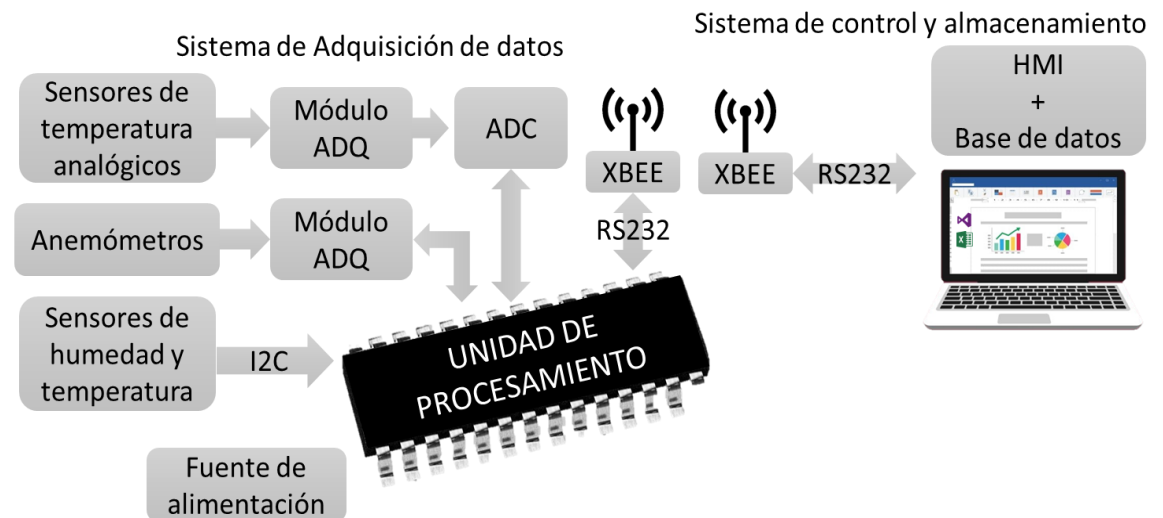
El microcontrolador cuenta con un programa escrito en lenguaje C que se encargará de controlar los ADC, obtener sus mediciones cada vez que le es solicitado por el módulo de control y almacenamiento, convertirlas de voltaje a la

magnitud correspondiente y encargarse del envío de datos por medio del módulo Xbee instalado.

El sistema de control y almacenamiento recibe las muestras que son enviadas utilizando otro módulo Xbee, dichas muestras serán procesadas por un programa escrito en C#, con el fin de darle el formato necesario para que de forma posterior sean almacenadas.

Figura 15.

Diagrama de bloques del proyecto



II.2.2 Sensores análogos

Según los requerimientos del sistema, se debe medir la temperatura del aire que circula a través del secador, en la superficie de acople del colector con la cámara de secado y en la parafina. Para esto se utilizaron sensores análogos que se describen a continuación.

II.2.2.1 Sensor de Temperatura del aire en el secador

Al ser una gran cantidad de sensores para el monitoreo de esta variable, el costo económico fue un gran punto a tomar en cuenta al momento de seleccionar el dispositivo, además de la disponibilidad en el mercado, por lo tanto se optó por

utilizar sensores LM35 por su accesibilidad en el mercado, cumplen con los requerimientos del sistema, están diseñado para trabajar en grados Celsius, no necesitan de ningún circuito externo para su funcionamiento o calibración, cuentan con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y con un rango de trabajo de -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$. Opera con voltajes de 4V a 30V con una precisión de 0.5°C^{22} . En la Tabla 6. Se comparan las principales características de este sensor con otros sensores similares.

Tabla 6

Tabla comparativa de sensores de temperatura

Sensor	Resolución	Rango de trabajo [$^{\circ}\text{C}$]	Linealidad
LM35	10 mV / $^{\circ}\text{C}$	-55 a 150	No
LM335	10 mV / $^{\circ}\text{K}$	-40 a 100	Si
Termistor	10K Ω / $^{\circ}\text{C}$	-50 a 300	Si

Figura 16.

Sensor de temperatura LM35



²² Anexo F. Hoja de datos LM35

Estos sensores se instalaron en distintos puntos para poder monitorear la temperatura del aire en todo su recorrido dentro del secador, desde su entrada en el colector hasta su salida en la parte superior de la cámara de secado.

Figura 17.

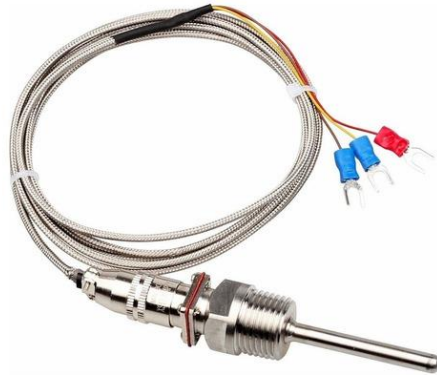
Sensor LM35 instalado en el colector



II.2.2.2 Sensor de temperatura de parafina y superficie

Se requería que estos sensores estuvieran en todo momento en contacto con la parafina distribuida a través de todo el colector y así monitorear su temperatura, por esto se optó por utilizar sensores RTD PT100 de la marca CrocSee, clase "A", los cuales tienen un rango de trabajo de -50°C a 300° , además de ser robustos y de mayor precisión. Estos cuentan con un encapsulado el cual consta de una rosca y tuerca para fijarlos en el lugar de instalación, este punto es muy importante ya que se debía evitar que la parafina se filtrara y despreciara. Estos sensores cumplen con los requerimiento establecido anteriormente para el monitoreo de estas variables.

Figura 18.
Sensor RTD PT100



Para el monitoreo de la temperatura en la superficie de acople entre el colector y la cámara de secado, se utilizaron los mismos sensores RTD PT100, pero de forma plana, esto con el objetivo de que haya una mayor superficie de contacto entre el sensor y la superficie de interés.

Figura 19.
Sensor RTD PT100 de sonda plana



II.2.2.3 Módulo de Acondicionamiento de señal para sensor LM35

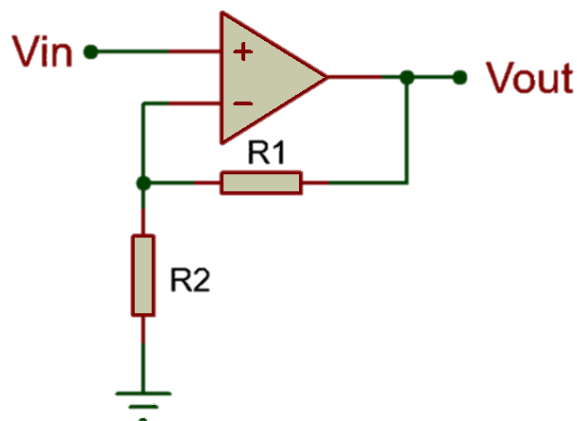
El acondicionamiento de señal es una de las etapas más importantes de cualquier sistema de adquisición de datos. Si por alguna razón el acondicionamiento de la señal y las conexiones no se realizan apropiadamente, el sistema de adquisición entregará información errada y de ninguna utilidad al usuario.

Debido a que la señal entregada por el sensor es en el orden de los milivoltios y que se consideró la utilización de un ADC de 12bits de resolución con voltaje de referencia a 5V, se optó por amplificar la señal antes de ser digitalizada, esto para aprovechar la resolución del ADC.

Para amplificar la señal se utilizó un amplificador no inversor; para determinar la ganancia de este se tomó en cuenta que los sensores LM35 aumentan 10mV por cada grado Celsius. Sabiendo que la temperatura máxima que medirán estos sensores es de 100°C, en la Ecuación 1 se calcula el máximo valor de voltaje entregado cuando se miden 100°C. En la Ecuación 2 se calcula la ganancia requerida para amplificar este voltaje a 5V, el cual es el voltaje de referencia de los ADC.

Figura 20.

Topología de un amplificador no inversor



(1)

$$\text{voltaje máximo} = 10\text{mV} * 100\text{ }^\circ\text{C} = 1\text{V}$$

(2)

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5\text{V}}{1\text{V}} = 5$$

Sabiendo que la ganancia debe ser 5 y estableciendo R2 a 100k se despeja R1 de la ecuación 3 para obtener su valor;

(3)

$$G = \frac{R_1}{R_2} + 1$$

$$R_1 = R_2(G - 1)$$

$$R_1 = 100\text{k}(5 - 1) = 400\text{k} \approx 390\text{k}\Omega$$

El valor próximo a 400kΩ es 390kΩ, por lo tanto, la ganancia del sistema queda establecida en,

$$G = \frac{390\text{k}}{100\text{k}} + 1 = 4.9$$

Despejando Vout de la ecuación 2 se determina el voltaje a la salida del amplificador.

(4)

$$V_{out} = G * V_{in} = 4.9 * 1 = 4.9\text{V}$$

De esta forma el voltaje amplificado cuando la temperatura sea máxima será de 4.9V.

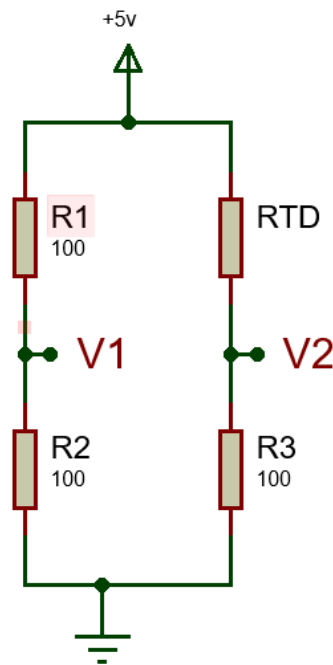
II.2.2.4 Módulo de Acondicionamiento de señal para RTD PT100

Como se mencionó anteriormente, la RTD PT100 varía su resistencia en dependencia a las variaciones de temperatura, pero esta variación de la resistencia es muy pequeña, utilizando un puente de Wheatstone podemos convertir estas variaciones de resistencia a voltaje utilizando dos divisores de voltaje, uno para la RTD y otro como voltaje de referencia, como se muestra en la Figura 21.

De esta forma cuando la resistencia de la RTD aumente, el voltaje en V2 disminuirá. Sabiendo que la resistencia de la RTD a 0°C es de 100Ω y estableciendo R3 a 100Ω , se forma un divisor de voltaje (V2), por lo tanto, R1 y R2 también serán de 100Ω , estableciendo un voltaje de referencia (V1) en 2.5V de esta manera no habrá diferencia entre los divisores de voltaje si no hasta cuando la resistencia de la RTD aumente debido a un cambio de temperatura.

Figura 21.

Puente de Wheatstone



Las variaciones de resistencia debido a la temperatura son muy pequeñas, esto indica que el voltaje en V2 variará en el orden de los milivoltios, por lo tanto, se utilizó un amplificador de instrumentación, AD620, el cual nos permite amplificar la diferencia entre el voltaje de referencia (V1) y el divisor de voltaje en la RTD (V2).

Además, el AD620 nos permite configurar la ganancia del amplificador estableciendo un valor de resistencia a Rg basándose en la siguiente ecuación²³:

(5)

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1$$

Sabiendo que la temperatura máxima esperada es de 110°C y utilizando la tabla de conversión de temperatura de la RTD²⁴, se obtiene que la resistencia máxima esperada de la RTD es de 142.29Ω, por lo tanto, la máxima diferencia de voltaje entre ambos nodos es de:

(6)

$$V2 = \frac{5V * R3}{RTD + R3} = \frac{5V * 100\Omega}{142.29\Omega + 100\Omega} = 2.06V$$

$$Vdif = V1 - V2 = 2.5V - 2.06V = 0.44V$$

Teniendo en cuenta que Vdif será de 0.44V y que el ADC a utilizar opera a un voltaje de 5V se establece la ganancia del amplificador de la siguiente manera:

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{5V}{0.44V} = 11.36$$

Por lo tanto, despejando Rg de la ecuación 5;

²³ Anexo G. Teoría de operación AD620

²⁴ Anexo H. Tabla de conversión de temperatura RTD PT100

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{11.36 - 1} = 4.768k\Omega \approx 4.7k\Omega$$

Al no contar con un valor de resistencia de 4.768kΩ en el mercado, el valor próximo es 4.7kΩ, de esta forma la ganancia del amplificador queda establecida, según la ecuación 4, en 11.51. Por lo tanto, el voltaje amplificado es de;

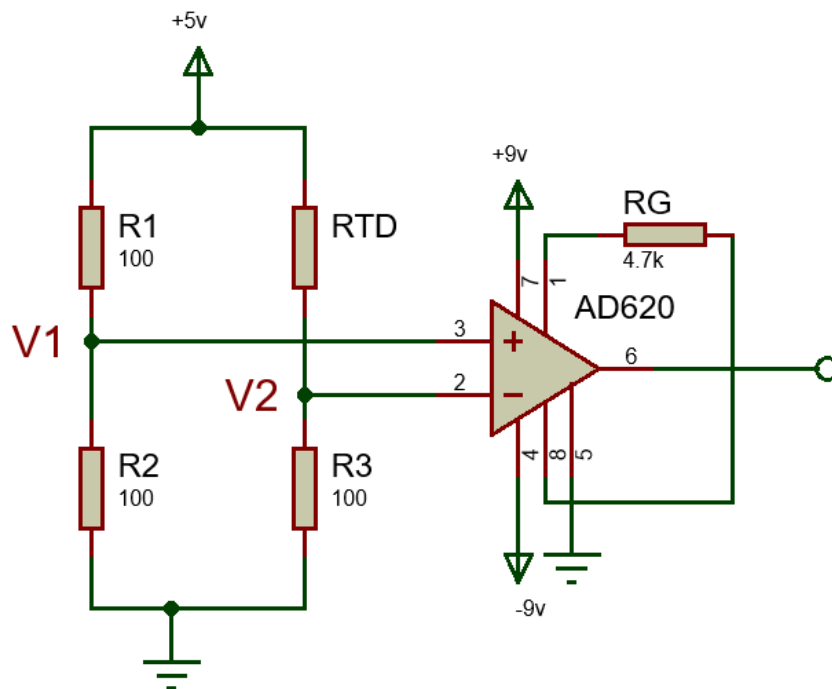
(7)

$$V_{out} = G * V_{in} = 11.51 * 0.44V = 5.06V$$

En la Figura 22 se muestra el circuito de acondicionamiento de señal utilizado para los sensores RTD PT100 utilizando el Puentes de Wheatstone y el amplificador de instrumentación AD620 con los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores.

Figura 22.

Circuito de Acondicionamiento de señal para RTD PT100



II.2.2.5 Simulación de los módulos de acondicionamiento de señal

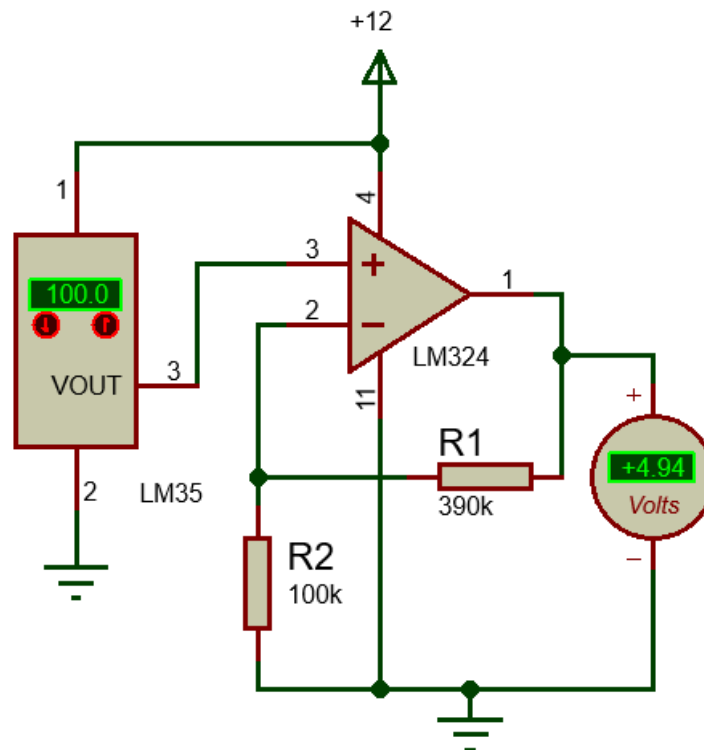
Se realizaron pruebas de simulación de los circuitos diseñados, con la finalidad de encontrar errores antes de que este sea implementado, además de comprobar de que este funcione con los requerimientos planteados con anterioridad. La simulación de los circuitos se llevó a cabo utilizando el software Proteus de la empresa Labcenter Electronics.

II.2.2.5.1 Simulación del módulo LM35

El uso del software Proteus nos facilitó poder simular el sensor LM35, ya que este viene incorporado en el programa, esto nos permitió seleccionar la temperatura a la que el sensor será sometido y a partir de esto evaluar el comportamiento del sistema haciendo uso de un voltímetro.

Figura 23.

Simulación circuito acondicionamiento de señal para sensor LM35



Se estableció la temperatura del LM35 a 100 °C, para comprobar lo establecido en la ecuación 4, donde se plantea que el voltaje amplificado será de 4.9V cuando la temperatura sea 100 °C.

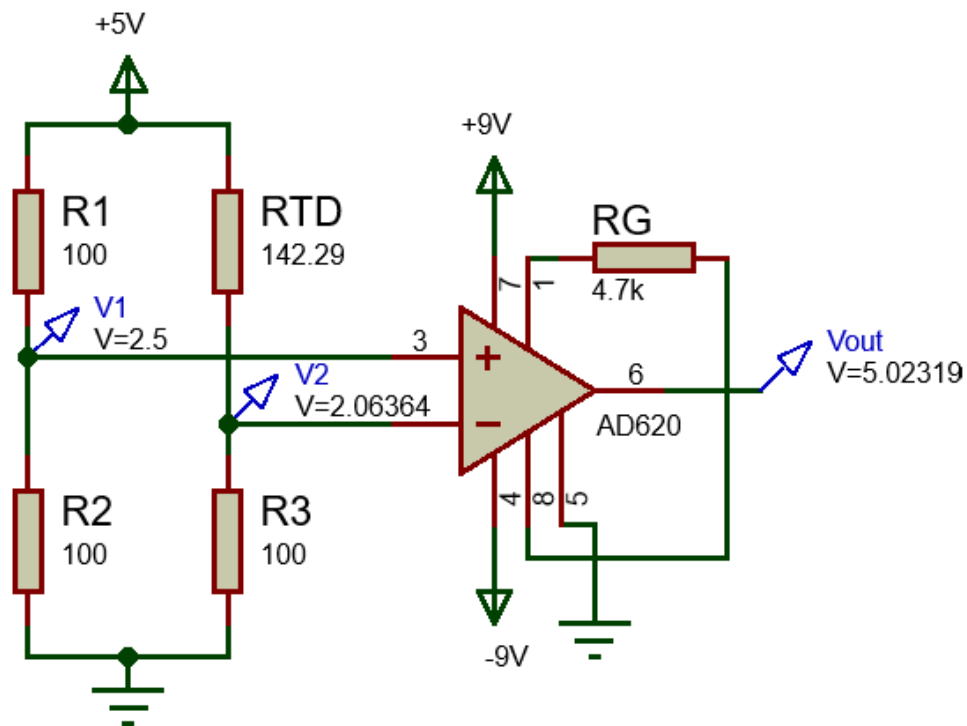
II.2.2.5.2 Simulación Módulo RTD

La simulación de este módulo se realizó tomando en cuenta la temperatura máxima que se espera de la RTD (110°C); sabiendo que la resistencia a esa temperatura es de 142.29Ω , se sustituyó la RTD por una resistencia de ese mismo valor. Basándonos en los cálculos anteriores, se establecieron los valores de las resistencias del puente de Wheatstone y la resistencia que define la ganancia del amplificador de instrumentación.

Haciendo uso de las herramientas proporcionadas por el software se midió el voltaje en los puntos de interés para poder compararlos con los valores calculados en las ecuaciones 6 y 7.

Figura 24.

Simulación circuito acondicionamiento de señal RTD



II.2.2.5.3 Error por tolerancia de elementos pasivos

La ganancia del amplificador establecido en el módulo de acondicionamiento de señal para los sensores LM35 está establecido por resistencias cuyos valores pueden variar dependiendo de la tolerancia de estas. Se utilizaron resistencias con tolerancia de 1% para poder determinar si esta tolerancia puede alterar el resultado esperado basado en las simulaciones se utilizó el software Multisim el cual nos permite establecer el porcentaje de tolerancia de las resistencias del circuito y usando la herramienta de simulación Worst Case se calculó el máximo error esperando si se toma en cuenta este dato.

La Tabla 7 muestra los valores asignados a las resistencias y el resultado de la simulación Worst Case versus la simulación en condiciones ideales.

Tabla 7.

Análisis Worst Case módulo acondicionamiento LM35

Parámetro	Valor nominal	Worst Case	% de error
Voltaje de Salida	4.94	4.97	0.60
R1	390k	393.9k	
R2	100k	99k	

De la misma manera se realizó este análisis con el módulo de acondicionamiento de los sensores RTD PT100, los cuales en su diseño también incluyen resistencias. Se tomo como tolerancia 1%.

Tabla 8.

Análisis Worst Case módulo acondicionamiento RTD

Parámetro	Valor nominal	Worst Case	% de error
Voltaje de Salida	5.02	5.49	9.36

R1	100	99
R2	100	101
R3	100	99
Rg	4.7k	4.653k

II.2.3 Sensores digitales

II.2.3.1 Anemómetro

Las entradas de aire del secador tienen forma cilíndrica, por lo tanto, se decidió utilizar anemómetros de tipo hélice para cubrir toda el área circular del cilindro con las aspas, de esta forma se cubre toda el área de interés y se evita obtener lecturas erróneas. Para esto se utilizaron dos anemómetros de la marca ERAY, en la Tabla 9 se muestran las principales características de estos.

Tabla 9.

Principales características anemómetros ERAY

Velocidad del aire	0.40 a 30 m/s
Resolución	0.01 m/s
Precisión	±3%
Tiempo de muestreo	1s
Sensor de temperatura	NTC
Temperatura del aire	-10 a 60 °C
Resolución Temperatura	0.1 °C

Nota: Tomado de ERAY Digital Anemometer Handheld Wind Speed Gauge Air Velocity Flow Volume Meter with Backlight LCD Display.

Figura 25.

Dimensiones Anemómetro ERAY



Los anemómetros ERAY cuentan con un módulo de medición con pantalla LCD que muestra la velocidad en metros sobre segundos y permite medir la temperatura. Este módulo no cuenta con ningún tipo de comunicación para compartir los datos medidos al sistema de medición del secador, por lo tanto, se descartó el uso de este y se optó por interpretar las señales entregadas por el anemómetro.

El funcionamiento del anemómetro ERAY consiste en un LED que emite un haz de luz infrarrojo, el cual, es captado por un receptor infrarrojo. Este haz de luz es interrumpido por las aspas del anemómetro, las cuales son 8, de esta manera se forma una onda cuadrada; una vez se cumplen 8 interrupciones, se habrá completado una revolución, de esta manera se pueden calcular las RPM²⁵.

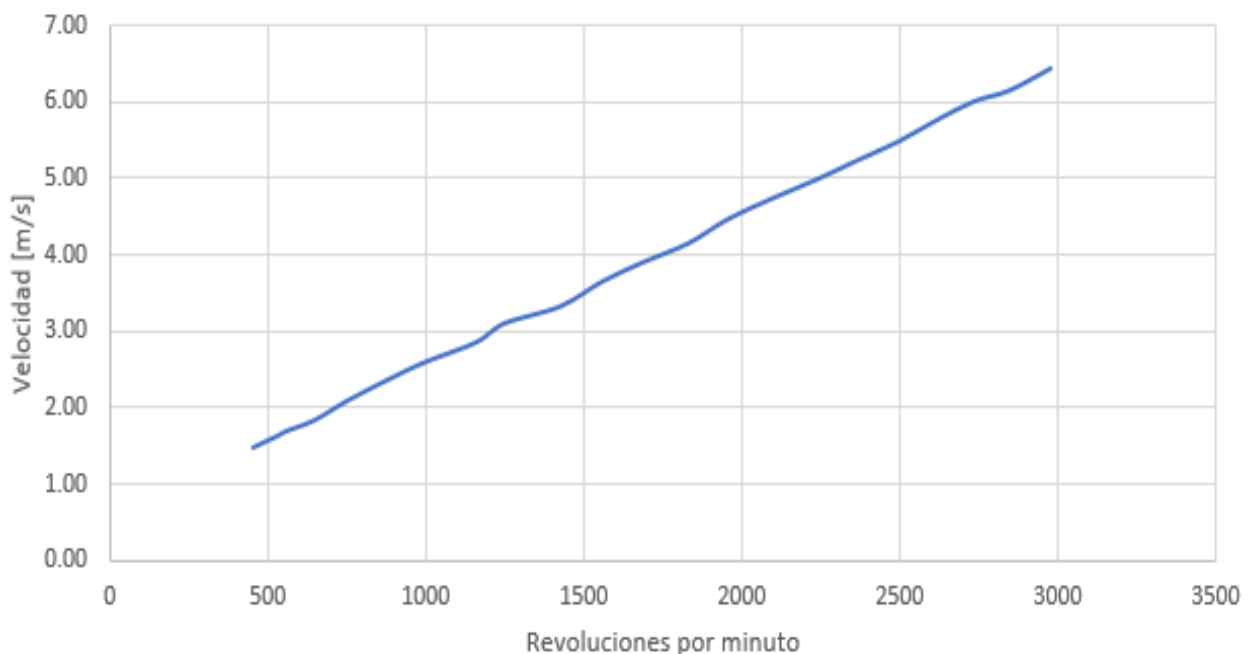
Utilizando una turbina instalada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQ, se generó un flujo de aire constante a distintas velocidades, con 5 segundos de espera para que los anemómetros ERAY se estabilizaran y así poder

²⁵ Revoluciones por minuto

simular un túnel de viento. Haciendo uso de otro anemómetro ERAY con su módulo de medición como referencia, se estableció una relación entre la velocidad en m/s del viento que está atravesando el anemómetro y las RPM. La relación obtenida se muestra en la Figura 26²⁶.

Figura 26.

Relación entre la velocidad medida por el anemómetro y sus revoluciones por minuto



Se puede observar que las RPM son directamente proporcional a la velocidad (m/s), es decir, las RPM aumentan a medida que la velocidad del viento aumenta. Además, se observa que la relación tiene un comportamiento lineal, de esta forma se pudo determinar una función matemática que defina el comportamiento de la gráfica.

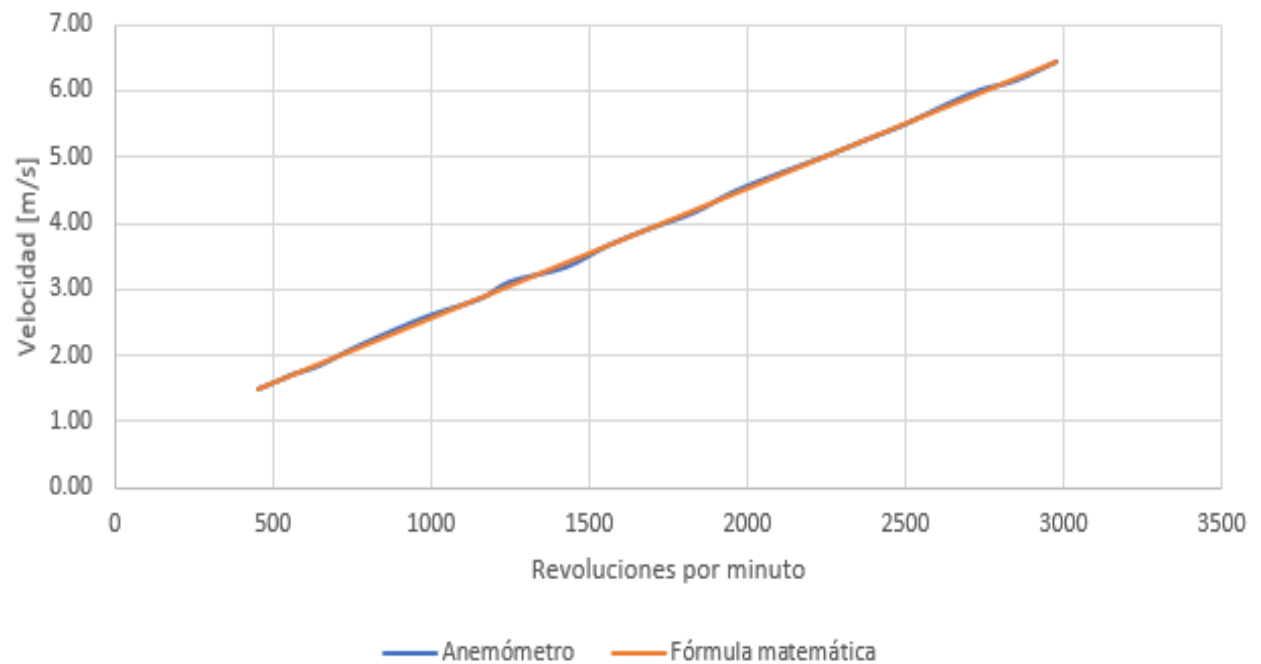
$$\frac{(RPM - 535.5)(4.81) + 4007.75}{2443.75}$$

²⁶ Anexo I. Datos de velocidad y RPM del anemómetro en túnel de viento

En la Figura 27 se compara la gráfica anterior, obtenida de los datos medidos por los anemómetros, versus, la gráfica obtenida con la fórmula matemática anterior.

Figura 27.

Gráfico comparativo entre los datos de los anemómetros versus la fórmula matemática



II.2.3.2 Sensor de temperatura y humedad AM2315

Se realizó la selección de este sensor mediante la comparación con otros sensores de humedad relativa como se muestra en la TABLA, tomando la decisión de utilizar el AM2315 ya que incorpora un sensor de temperatura en su encapsulado, además de contar con comunicación I2C, evitando el uso de canales ADC y no requiere de ningún circuito de acondicionamiento.

Tabla 10

Tabla comparativa de sensor de humedad

Sensor	Rango de Humedad [HR]	Precisión de Humedad	Rango de temperatura [°C]	Precisión de Temperatura	Voltaje de Operación [V]
AM2315	0-99	±2%	-40 a 125	±0.1	3.5 a 5.5
DTH-22	0-99	±2%	-40 a 80	±0.5	3.5 a 5.5
DTH-11	20-90	±5%	0 a 50	±1	3.5 a 5.5

Según lo establecido en los requerimientos del sistema, se requiere medir la temperatura y humedad en las entradas y extractor de aire. Como se mencionó anteriormente, este sensor cuenta con una interfaz de comunicación I2C, por lo tanto, se conecta directamente al microcontrolador haciendo uso de dos pines, uno para sincronizar el reloj y otro para la transmisión de datos, el microcontrolador se encarga de alimentar un sensor a la vez, solo cuando se requiera su lectura, esto para reducir el consumo de energía del sistema. En la Figura 28 se muestra una imagen del sensor utilizado.

Figura 28.

Sensor AM2315



II.2.4 Microcontrolador

El microcontrolador es el componente más importante del sistema, ya que es el que realiza el procesamiento de las señales que son entregadas por los Módulos de adquisición y los ADC externos, además se encarga del envío de los datos por medio de un radiotransmisor hacia la HMI donde los datos serán guardados para su posterior análisis.

II.2.4.1 Requerimientos del microcontrolador

Comercialmente existen un gran número de microcontroladores con diferentes especificaciones técnicas, por lo que se hace necesario definir primero los requerimientos, es decir, plantear las necesidades que el sistema necesita cubrir y así evitar que se presenten limitaciones técnicas, sin embargo, se debe tomar en cuenta no sobredimensionar el sistema ya que esto tiene una repercusión a nivel económico.

Primeramente, es necesario conocer la cantidad de pines de Entrada/Salida que son requeridos por cada uno de los componentes y módulos conectados al microcontrolador para determinar la cantidad mínima de puertos E/S que este debe contar. Cabe resaltar que ciertos componentes necesitan que el microcontrolador posea ciertas características específicas, por ejemplo, contar con puertos de comunicación RS232, SPI, ADC, timers, comparadores, entre otros de tal manera se debe identificar qué características necesita tener integradas el microcontrolador para interacción con estos dispositivos.

En la Tabla 11 se muestra la cantidad de pines E/S para cada uno de los componentes y módulos requeridos:

Tabla 11.

Pines requeridos para selección del microcontrolador

Componente	Pines requeridos	Módulo
Módulo LM35	16	ADC
Módulo RTD	8	ADC
Sensores AM2315	4	I2C
Comunicación	2	USART
Anemómetros	2	
MCLR	1	
Led de estado	1	

Debido a la gran cantidad de ADCs requeridos por el sistema se optó por utilizar ADCs externos, esto nos permitió disminuir el uso de recursos del microcontrolador, además de brindar escalabilidad al sistema en caso se requiera monitorear más sensores. En base a lo planteado se decidió utilizar el ADC MCP3208 ya que este cuenta con 8 canales con una resolución de 12 bits, alimentación 2.7V – 5.5V y comunicación SPI, lo que permite que con pocos pines se controlen varios ADCs.

Tomando en cuenta los ADC externos, los requisitos que debe cumplir el microcontrolador son los siguientes:

- Comunicación SPI
- Comunicación I2C
- Módulo USART
- 9 pines de E/S

II.2.4.2 Selección de microcontrolador

Al momento de escoger el microcontrolador para un sistema concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles, su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador. En la Tabla 12 se hace una comparativa entre distintos microcontroladores y sus principales características.

Tabla 12

Tabla comparativa de microcontroladores

	PIC16F877A	ATMEGA328P	PIC18F4550	ATMEGA2560
Velocidad de reloj	20 MHz	16 MHz	48 MHz	16 MHz
Pines digitales E/S	33	14	35	54
ADC	5	6	13	16
Memoria Flash	8 kb	32 kb	32 kb	256 kb
SRAM	368 bits	2 kb	2 kb	8 kb
EEPROM	256 bits	1 kb	256 bits	4 kb

El ATMEGA328P es un microcontrolador creado por Atmel perteneciente a la familia de la serie megaAVR, este cumple con los requerimientos planteados anteriormente²⁷. Se ha seleccionado el ATMEGA328P ya que se considera un microcontrolador de alto rendimiento, además de cumplir con la cantidad de pines de E/S requeridos, posee una memoria de 32Kbytes para la implementación de software, cuenta con módulos USART para comunicación y programación en caso de actualizaciones del programa y módulos para comunicación I2C y SPI y cuenta con IDE que no tiene ningún costo.

²⁷ Anexo J. Tabla de asignación de pines para el microcontrolador

En la Tabla 13 se muestran las principales características que posee el microcontrolador ATMEGA328P.

Tabla 13.

Características principales del microcontrolador ATMEGA328P

Frecuencia de máxima de operación	20MHz
Flash	32Kbytes
SRAM	2KBytes
EEPROM	1Kbytes
Voltaje de operación	1.8V - 5.5V
Timers	3
Pines E/S	28
Modulo USART	1
SPI	2
I2C	1

II.2.5 Digitalización

La digitalización o conversión análoga-digital consiste en la transcripción de las señales análogas proporcionadas por los sensores en señales digitales que puedan ser interpretadas por el microcontrolador.

II.2.5.1 Error de cuantización del ADC

El ADC muestrea y cuantiza la señal analógica de entrada en código digitales equivalentes como salida. Estos códigos digitales tienen un error de cuantización que es equivalente a $\pm 1/2$ LSB, un ADC nunca será más preciso que

este error de cuantización inherente. Es decir, que existe un porcentaje de información que se pierde al momento de la digitalización.

Para calcular el error de cuantización por el ADC se utiliza la siguiente ecuación.

$$E_{ctz} = \frac{V_{fes}}{(2^n) * 2}$$

Donde:

- Ectz: error de cuantización
- Vfes: es el rango de voltaje de la señal análoga
- n: es el número de bits del ADC

$$E_{ctz} = \frac{5V}{(2^{12}) * 2} = 0.610mV$$

El error de cuantización de los ADC a utilizar es de 0.610mV equivalente al 0.012% de la información proporcionada por la señal análoga.

II.2.6 Sistema de comunicación

A continuación, se describe el proceso de selección e implementación del sistema de comunicación encargado de la comunicación desde el sistema de adquisición de datos instalado en el secador hasta la interfaz HMI y base de datos.

II.2.6.1 Formato de salida de datos

El sistema requiere monitorear 16 sensores LM35, 8 sensores RTD, 2 sensores de humedad y 2 de temperatura (AM2315), 2 anemómetros, para esto se utilizó una matriz de 10 bytes por 30 filas, donde cada fila representa un sensor y está distribuida como se muestra en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14.

Formato de comunicación

[2 Bytes]	[1 Byte]	[1 Byte]	[5 Bytes]	[1 Byte]
Sincronización	Comando	Variable	Datos	Postambulo
10 Bytes x 30 filas Hexadecimal				

II.2.6.2 Requerimientos del sistema de comunicación

Tomando en cuenta lo antes mencionado, se requiere transmitir un total de 30 paquetes de 10 bytes, es decir, 300bytes, con una tasa de muestreo mínima, según los criterios de desempeño, de 1 minuto, por lo cual se tiene una tasa de transferencia de datos de 40bps.

Otro requerimiento es el alcance de la tecnología inalámbrica, ya que el secador con los módulos de adquisición de datos está instalado en la azotea del edificio de la FEC y el sistema con el almacenamiento de datos estará instalado en el Laboratorio de Procesos de la FIQ en la primera planta del edificio, sin línea de vista.

II.2.6.3 Selección del sistema de comunicación

En base a consideraciones prácticas y a la ubicación del secador solar, se podría utilizar la red WiFi que ya se encuentra instalada en el edificio de la FEC, pero esto supone depender de la estabilidad, seguridad y funcionamiento de esta mientras dure el periodo de prueba. Otra alternativa es la tecnología Bluetooth pero esta no cumple con lo requerido debido a que trabaja a cortas distancias sin agregar que no existe línea de vista entre el módulo de adquisición de datos y el módulo de almacenamiento.

En base a los requerimientos mencionados anteriormente, se decidió utilizar módulos Xbee S3B, los cuales cuentan con un ancho de banda variable,

desde 10Kbps hasta 200Kbps y una capacidad de consumo variable en dependencia de la distancia de transmisión que va desde 1mW hasta 250mW. En la siguiente tabla se resumen las principales características de los módulos Xbee S3B y en la figura 10 se muestra el diagrama básico de un sistema de comunicación usando Xbee.

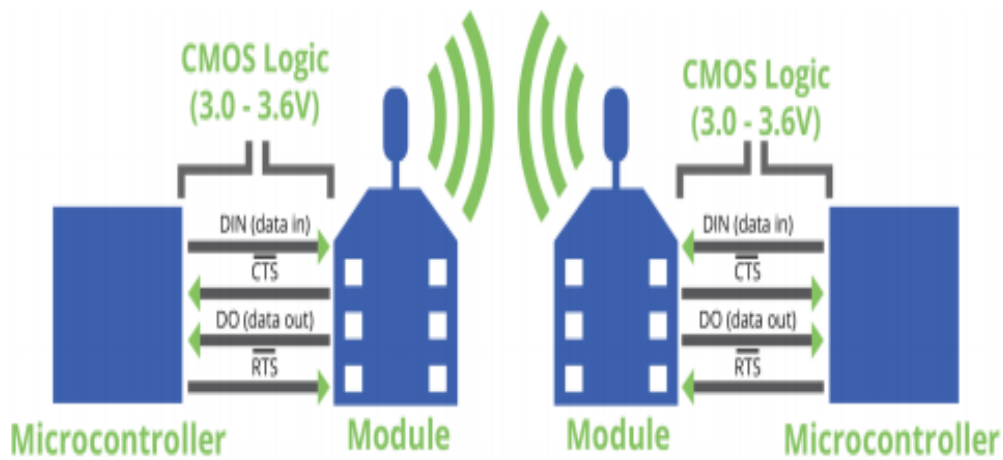
Tabla 15.
Características del módulo Xbee S3B

Características	
Banda de frecuencia	902 a 928 MHz
Opciones de antena	Cable, U.FL y RPSMSA
RF data rate	10Kbps o Kbps
Cobertura en área urbana	610m a 10kbps; 350m a 200Kbps
Cobertura en línea de vista	15.5km a 10kbps; 6.5km a 200kbps (con antena dipolo de 2dBi)
Potencia de transmisión	Hasta 24dBm (250mW)
Sensibilidad del receptor	-110dBm a 10kbps; -101dBm a 200kbps
Interfaz de comunicación	USART / SPI
Direccionamiento	MAC 64 bits

Nota: Tomado de ¿Qué es XBee? por Digi International, 2017.

Figura 29.

Diagrama de enlace punto a punto usando módulos Xbee S3B



Nota: Tomado de ¿Qué es XBee? por Digi International, 2017.

II.2.6.4 Configuración de los módulos Xbee

La configuración de los módulos Xbee se hace a través del software XCTU, el cual permite configurar el firmware de los módulos para que se adapte a los requerimientos del sistema, permite modificar el modo de operación hasta regular la potencia de transmisión con respecto a la distancia de cobertura deseada. Este mismo software ofrece la posibilidad de realizar pruebas del enlace de comunicación y estabilidad de la red para determinar qué tan confiable es el sistema partiendo de la cantidad de paquetes perdidos y de los valores RSII.

Estos módulos tienen la capacidad de operar en diferentes topologías de red, entre las que destaca peer to peer y en malla. Para la implementación del sistema de comunicación de este proyecto se ha optado por una conexión peer to peer debido a que no es necesario establecer un modo de operación más complejo.

Los parámetros más importantes que el software XCTU permite modificar para los requerimientos de este proyecto son los siguientes:

- **HP** Identificador de preámbulo, este parámetro establece que solo los módulos con HP de mismo valor puedan establecer comunicación entre sí, esto para evitar interferencia con otros módulos. Para este proyecto se estableció el preámbulo con valor de 0x05H.
- **ID** Identificador de red, una vez se allá establecido la conexión verificando los preámbulos se verifica que ambos módulos pertenezcan a la misma red. Este parámetro se ajustó al valor 0x3332H.
- **PL** Nivel de potencia de salida del transmisor, dicho parámetro se puede ajustar a los siguientes valores, +7dBm, +15dBm, +18dBm, +21dBm, +24dBm, para la aplicación de este proyecto se ha seleccionado la menor potencia ya que la distancia entre ambos módulos es corta.
- Dirección de destino, todos los módulos cuentan con una dirección única de 64 bits, la cual es usada para ser identificados en las distintas topologías de red, los módulos utilizados en este proyecto cuentan con las siguientes direcciones **13A2004152779E Y 13A2004152779B**. En el firmware este parámetro se encuentra dividido en dos secciones, la parte alta **DH** (los 32 bits más significativos) y la parte baja **DL** (los 32 bits menos significativos).
- Interfaz serial, se ha configurado la velocidad de transmisión a 19200 baudios, la paridad de datos, el bit de stop y el modo de operación de este puede ser modo transparente o API, en esta ocasión se han configurado en el primer modo por ser un enlace peer to peer, por lo tanto, los módulos trabajarían como si de un cable serial se tratase.

II.2.7 Sistema de alimentación y respaldo

El sistema de adquisición de datos estará instalado en el secador, el cual se encuentra en la azotea del edificio de la FEC. El sistema con HMI y la base de datos están instalados en una PC ubicada en el Laboratorio de Procesos de la FIQ, esta PC cuenta con una UPS la cual sirve como regulador de voltaje y backup en caso falle la energía eléctrica comercial. Debido a la duración de las pruebas

se decidió utilizar ésta UPS como respaldo tanto para la PC (interfaz HMI y base de datos) como del sistema de adquisición de datos.

II.2.7.1 Censo de carga

En la Tabla 16 se muestran los componentes de mayor consumo del sistema.

Tabla 16.
Consumo de los componentes del sistema

Componente	Cantidad	Consumo (mA)	Consumo total (mA)
LM35	16	0.06	0.96
AD620	8	1.3	10.4
ATMEGA328P	1	16.43	16.43
Xbee S3B	1	215	215
MCP3208	3	0.4	1.2
LM324	6	0.7	4.2
Anemómetros	2	30	60
AM2315	2	0.5	1
Circuito RTD	8	50	400
TOTAL			709.19

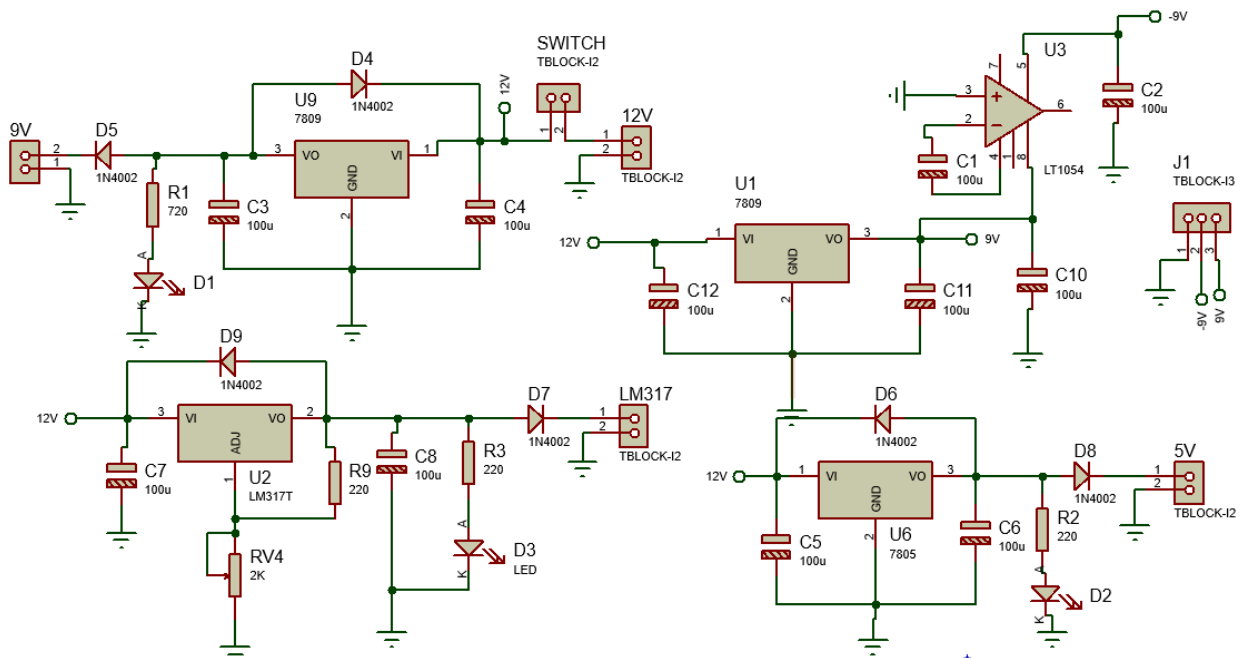
II.2.7.2 Fuente alimentación DC

Como fuente de alimentación se optó por utilizar una fuente conmutada de bajo costo y alta fiabilidad de la marca Mulview Technology, de la serie S-120-12²⁸ la cual cuenta con una entrada de 110Vac y una salida de 12Vdc – 10A, además de brindar protección contra corto circuitos y sobre carga.

El voltaje de operación de los módulos de adquisición de los LM35 es de 9V; $\pm 9V$ y 5V para las RTDs; 5V para el microcontrolador y demás integrados. Para obtener estos voltajes lineales a la salida de 12V se utilizaron reguladores de voltaje tales como LM7805, LM7809, LM7909 y LM317. Para obtener los -9V se tuvo que agregar un inversor de voltaje a la salida de un LM7809 para convertir el voltaje de positivo a negativo, para esto se utilizó el integrado LT1054. En la Figura 30 se muestra el diagrama esquemático de los circuitos de reguladores de voltaje utilizando el software Proteus.

Figura 30.

Esquemático fuente de alimentación con reguladores de voltaje



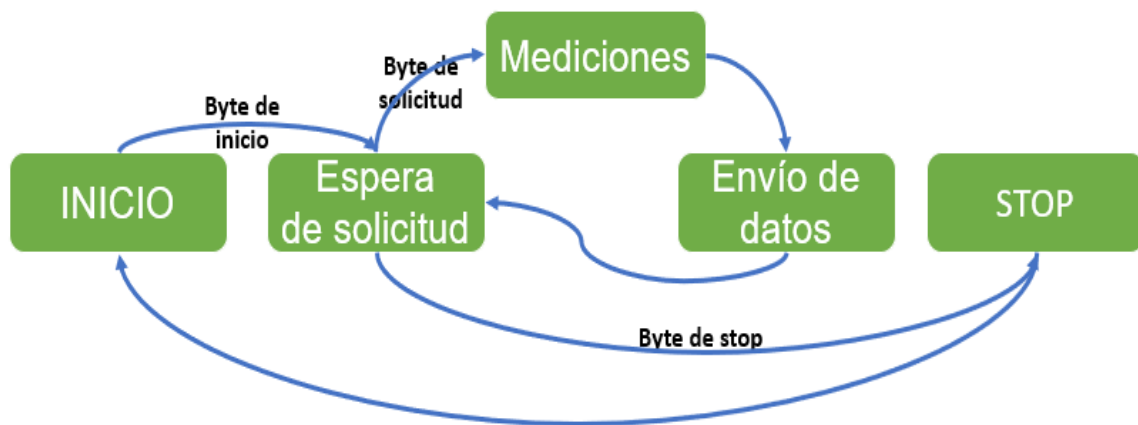
²⁸ Anexo K. Hoja de datos fuente conmutada S-120-12

II.2.8 Programación del microcontrolador

Para el desarrollo del programa que ejecuta el microcontrolador se elaboró la siguiente máquina de estados, la cual se muestra en la Figura 31. Para propósitos de prueba se programó el ATMEGA328P para que se pudiera reprogramar por medio de SPI haciendo uso de otro microcontrolador, de esta manera se brinda comodidad al momento de realizar actualizaciones al programa.

Figura 31.

Máquina de estados del microcontrolador



Las funciones que cumplen cada uno de los estados se describen a continuación:

- **Inicio:** En el primer estado el microcontrolador está en espera para establecer la comunicación entre el sistema de adquisición de datos y el sistema de control y almacenamiento.
- **Espera de solicitud:** El microcontrolador establece la comunicación inalámbrica entre el sistema de adquisición y el sistema de control, a la vez enciende un led como indicativo que la conexión se ha establecido correctamente y queda esperando el comando por parte del sistema de control para la solicitud de mediciones.
- **Mediciones:** Se toma la medida presentada por los sensores y se digitaliza (LM35, RTD) o se procesa (anemómetros, AM2315) y son

guardados en el buffer de salida para su posterior uso en el siguiente estado.

- **Envío de datos:** Se envían los datos guardados en el buffer de salida y permanecerá en este estado hasta el buffer de salida es vacío, lo que indica que todos los datos fueron enviados. Una vez completado el proceso regresa al estado de espera de solicitud.
- **Detener:** Si se recibe el byte de stop, cuando el programa llegue al estado de espera de solicitud, pasa al estado de detener donde se reinician ciertos parámetros y variables para luego enviar el programa nuevamente al estado de inicio.

II.2.9 Programación del sistema de almacenamiento

El sistema cuenta con un sistema de control y almacenamiento, este está alojado en una PC proporcionada por la FIQ para el desarrollo de este proyecto. Este sistema es el encargado de la recepción procesamiento, almacenamiento y visualización de la información suministrada por el sistema de adquisición. Este sistema consta de una interfaz gráfica realizada en el software Visual Studio y una base de datos implementada en MySQL Server.

La interfaz gráfica desarrollada para este proyecto contiene una ventana de inicio donde únicamente los encargados del proyecto pueden acceder ingresando su nombre de usuario y contraseña, de esta manera se evita que personas ajenas al proyecto tengan acceso al programa. Los usuarios y contraseñas están almacenados en el servidor MySQL en la tabla llamada "usuarios" en el esquema "secador".

Figura 32.

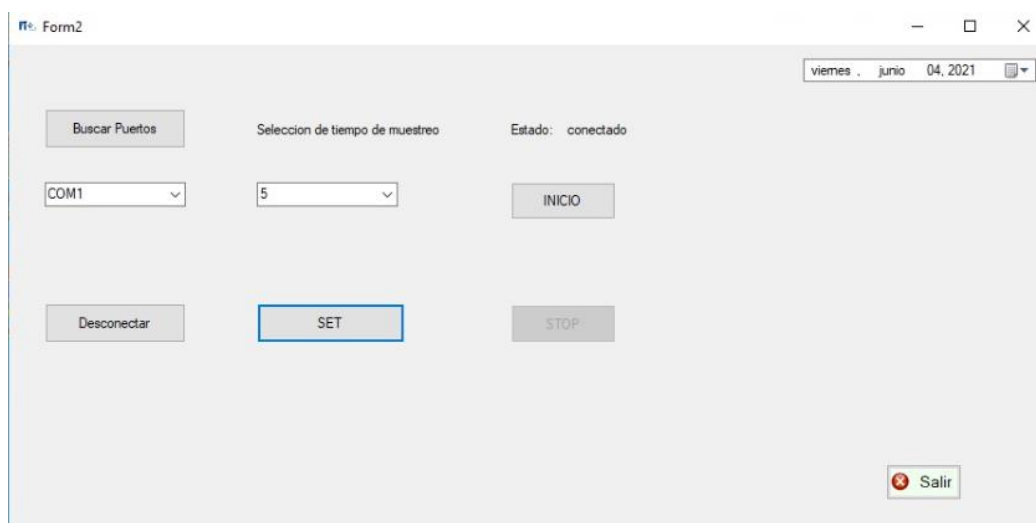
Pantalla de inicio de sesión del software de monitoreo



Una vez el usuario ha iniciado sesión con sus datos, se muestra una ventana donde se deben establecer los parámetros de comunicación; además se establece el tiempo en que se deben solicitar las muestras al sistema de adquisición de datos, también cuenta con un botón de set, para establecer la comunicación, y botones de Start y Stop que dan inicio y detienen la transmisión de datos desde el sistema de adquisición.

Figura 33.

Interfaz de control y configuración



La información obtenida de los sensores se guarda en la base de datos y se puede visualizar desde el software Excel del paquete Microsoft Office, el cual, cuenta con una herramienta de integración con MySQL Server.

Debido a que el sistema cuenta con 25 variables a ser monitoreadas se establecieron nomenclaturas²⁹, estas se describen por grupos, en la Tabla 17, esto con el propósito de poder identificar los equipos, tanto en el sistema de almacenamiento como en las placas diseñadas para el sistema de adquisición. De esta forma también se reduce el uso de recursos por parte del microcontrolador y los módulos Xbee al no asignar nombres a cada variable evitando el uso de caracteres extendidos.

Tabla 17.

Disposición y nomenclatura de los sensores por placa

Placa	Sensor	Variable	Nomenclatura
U1	LM35	Temperatura	A0 - A7
U2	LM35	Temperatura	B0 - B7
U3	RTD PT100	Temperatura parafina	D0 - D3
U3	RTD PT100	Temperatura superficial	D4 - D7
U4	Microcontrolador	Flujo de aire	E0 -E1
U4	Microcontrolador	Temperatura y humedad	F0 – F3

II.3 Presentación de resultados

II.3.1 Implementación de los circuitos impresos

Para el diseño de los circuitos impresos se utilizó el software Ares de la suite de Proteus ya que contiene una amplia librería de componentes electrónicos

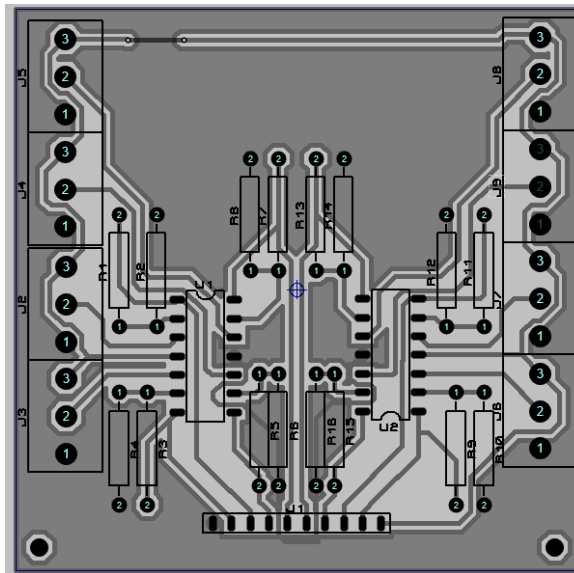
²⁹Anexo L. Nomenclatura de los sensores

y herramientas que facilitan el proceso de diseño. Para la implementación de todos los circuitos del sistema se implementaron 5 PCB (Printed Circuit Board).

Se diseñó e implementó 2 PCB dedicadas al acondicionamiento de los sensores LM35, cada una con capacidad para 8 sensores. Las dimensiones de cada PCB es 7.50 cm x 7.75 cm como se muestra en la Figura 34.

Figura 34.

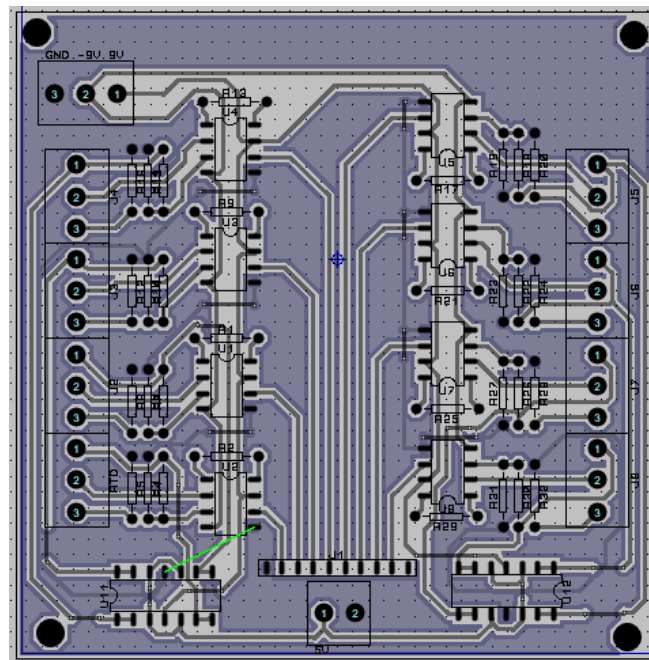
PCB del módulo de adquisición de los LM35



De la misma manera se diseñó una PCB para el módulo de acondicionamiento de señal de las RTD, esta cuenta con 8 canales, 4 para las RTD de sonda y 4 para las RTD de forma plana. Esta tiene dimensiones de 10.5cm x 10.25 cm

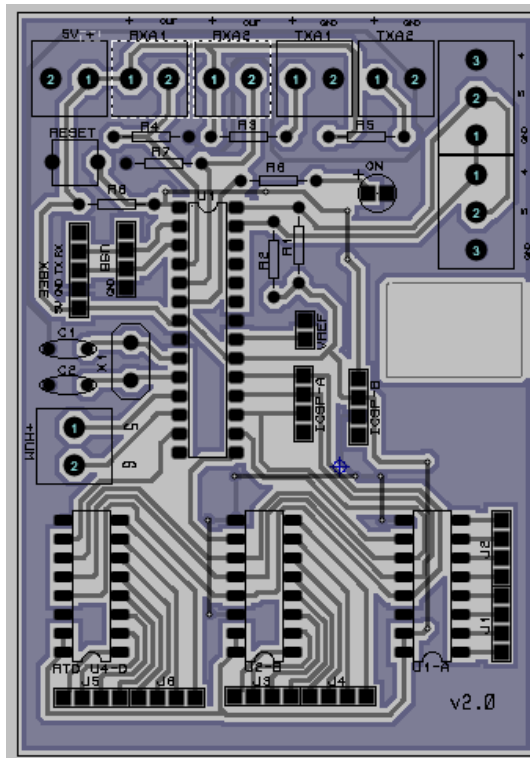
Figura 35.

PCB módulo de adquisición de las RTD



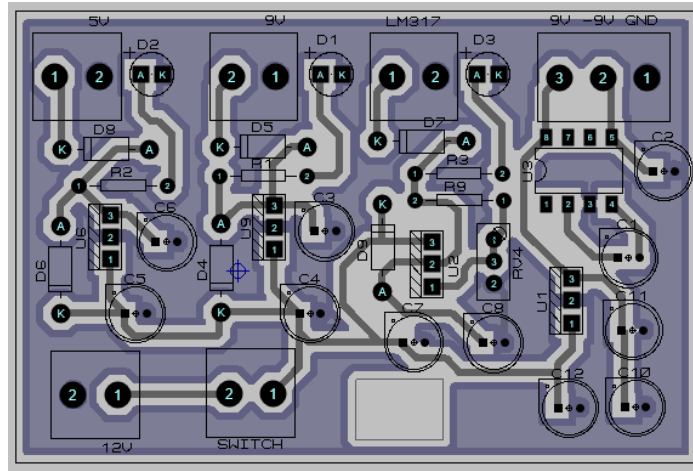
También se diseñó una PCB dedicada al microcontrolador y los módulos que este controla directamente, tales como, ADCs, sensores AM2315, anemómetros, led de estado, botón de Reset, módulo de comunicación. Esta PCB cuenta con dimensiones de 10 cm x 7 cm y se muestra en la Figura 36.

Figura 36.
PCB del microcontrolador



Debido a que se utilizó una fuente conmutada con salida 12V y el sistema requiere voltajes de +9V, -9V, +5V y una fuente variable, se diseñó una PCB para proveer estos niveles de voltaje al sistema. Esta tiene dimensiones de 5.25 cm x 8.00 cm como se muestra en la Figura 37.

Figura 37.
PCB de los reguladores de voltaje



II.3.2 Resultados Obtenidos

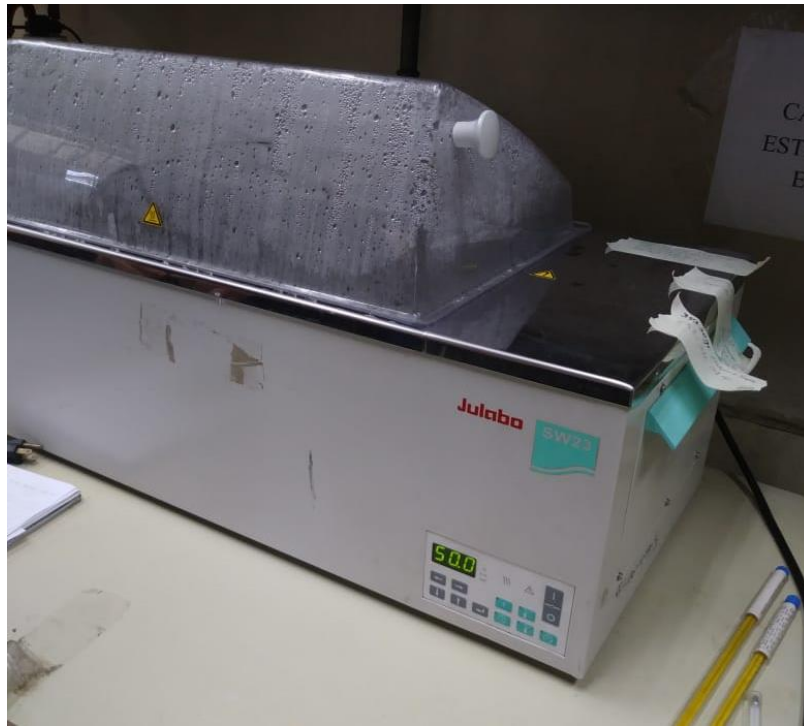
II.3.2.1 Pruebas de Laboratorio

Una vez implementados los circuitos impresos de los módulos, se procedió a realizar pruebas de cada uno de los módulos en ambientes controlados y realizando comparaciones con equipos de referencia. Todas las pruebas descritas a continuación fueron realizadas en el Laboratorio de Procesos de la FIQ utilizando un equipo de baño térmico de la marca Julabo, modelo SW23³⁰, y un termómetro de mercurio con una precisión de 0.1 °C. El baño térmico cuenta con una estabilidad de ± 0.02 °C para mantener la temperatura al valor establecido.

³⁰ Anexo M. Hoja de datos Julabo SW23

Figura 38.

Baño térmico Julabo SW23



Basándonos en los datos³¹ obtenidos de las pruebas se determinó el máximo error para los módulos de adquisición de los sensores LM35 y RTD, tomando como referencia el termómetro de mercurio mencionado anteriormente.

Para el módulo de adquisición de los LM35 el máximo error absoluto obtenido fue de 0.30 °C y para el módulo de las RTD fue de 0.3 °C.

II.3.2.2 Pruebas de transmisión XCTU

Se realizaron pruebas del enlace de comunicación y estabilidad de red para determinar qué tan confiable es el sistema a partir de la cantidad de paquetes perdidos (probabilidad de error) y los valores de RSII³² utilizando el software XCTU. En estas pruebas no se hizo uso de antenas de alta ganancia, sino que se utilizaron las antenas de alambres que vienen por defecto soldadas a los módulos.

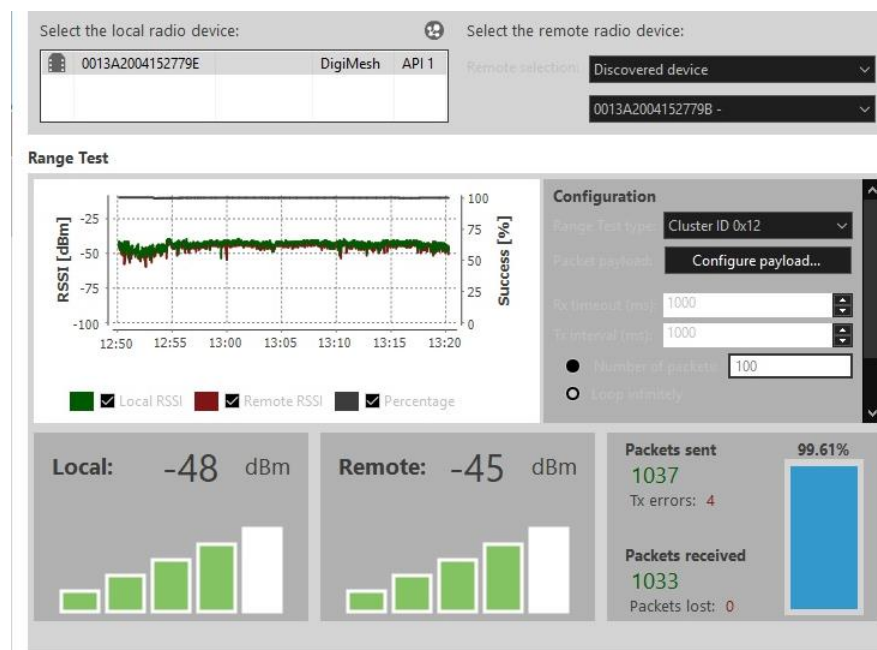
³¹ Anexo N. Datos Pruebas de Laboratorio

³² Received Signal Strength Indicator

La distancia entre el sistema de adquisición y el sistema de control es de, aproximadamente 15 metros y no existe línea de vista entre transmisor y receptor, además se debe tomar en cuenta la interferencia causada por la estructura del edificio. Se logró establecer una comunicación en la cual la RSSI se mantuvo con pocas variaciones, además en el periodo de dicha prueba la comunicación no se interrumpió y se recibió el 99.61% de los paquetes transmitidos.

Figura 39

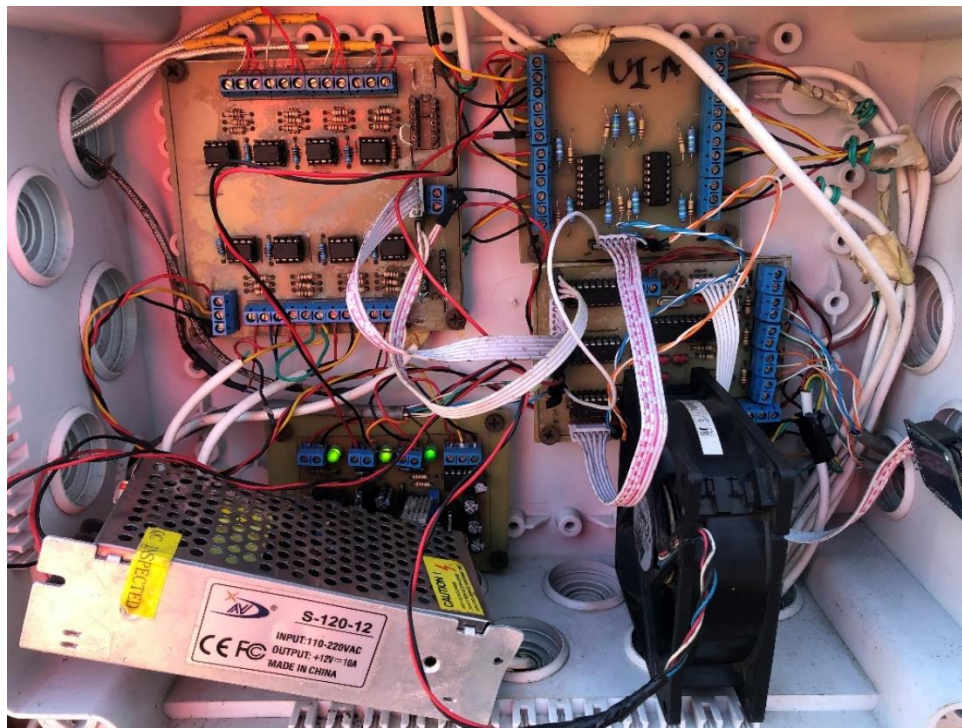
Pruebas de comunicación con el software XCTU



II.3.2.3 Pruebas en el secador

Se realizó la instalación de los sensores, de las placas del sistema de adquisición de datos haciendo uso de una caja PVC IP55 con dimensiones 220 x 170 x 86 mm, esto para evitar que las condiciones ambientales dañen los sistemas instalados, además el material PVC no interfiere con el radioenlace entre los módulos Xbee.

Figura 40.
Sistema de adquisición de datos



Se realizó una primera prueba, estableciendo, la conexión entre el sistema de adquisición de datos con el sistema de control y almacenamiento haciendo uso del software desarrollado, se verificó el enlace observando el led de estado el cual se enciende una vez se establece la conexión con el sistema de control. Posteriormente se procedió a iniciar la obtención de los datos medidos por los sensores. Se observó que, en la lectura de los sensores, algunos presentaban valores incorrectos.

Por lo tanto, se procedió a detener la ejecución del proceso. Se determinó que el fallo que presentaban los sensores era debido a un mal contacto entre los cables del sensor con las terminales de las tarjetas de adquisición de los LM35 y RTD. Los cables son multifilares y al conectarlos a la terminal, la presión del tornillo abre los hilos y otros quedan sin hacer contacto con la parte conductora. Para mejorar la conexión entre ambos se procedió a soldar la punta de los cables

con estaño para que estos tengan mejor contacto entre sí y no se separen al momento de hacer la conexión con el terminal block de las tarjetas.

Luego, se procedió a realizar una segunda prueba, donde se solucionó el problema de lectura de los sensores. Una vez se obtuvieron una cantidad considerable de lecturas se observó que, los datos de algunos sensores variaban drásticamente entre cada lectura, la cual estaba configurada a 3 minutos. Analizando los datos y filtrando los sensores que presentaban problemas se determinó que eran los sensores que estaban más alejados de la tarjeta principal del sistema de adquisición, por lo tanto, haciendo uso de otra caja PVC IP55 de dimensiones 105 x 105 x 55 mm, se instaló una de las tarjetas de adquisición de los LM35 en un punto cercano a los sensores, de esta manera se redujo la longitud de los cables de los sensores. La alimentación y comunicación entre esta tarjeta y la tarjeta del microcontrolador se realizó a través de cable UTP CAT V. El hecho de haber diseñado el sistema de adquisición por módulos nos dio la ventaja de separar el módulo de adquisición de los LM35 del módulo del microcontrolador sin tener que rediseñar ninguna placa o circuito.

Una vez realizado este movimiento, se procedió a realizar una tercera prueba, configurando la lectura de los datos a 3 minutos. A medida que el tiempo transcurría se iba actualizando la base de datos con la lectura de los sensores, donde se comprobó el correcto funcionamiento del sistema ya que no se obtuvieron lecturas erróneas ni valores con cambios considerables entre lecturas. A partir de esto, se dejó el sistema en funcionamiento por 4 días.

II.3.3 Costos del proyecto

El sistema en su totalidad tuvo un costo de \$1031.87 dólares, en donde los principales componentes utilizados para el desarrollo de este proyecto fueron importados dado que no se encuentran en el mercado local, mientras que los componentes básicos, de propósito general si fueron adquiridos nacionalmente. En la Tabla 18 se muestra el detalle de los costos de los equipos del sistema, así como la mano de obra.

Tabla 18

Tabla de Costos del proyecto

Descripción	Cantidad	Costo
Sensor LM35	12	\$27.12
Sensor AM2315	2	\$31.02
Anemómetro ERAY	2	\$54.74
RTD PT100	8	\$119.84
Componentes electrónicos		\$149.52
Caja PVC IP55	2	\$29
Fuente DC S-120-12	1	\$20
ATMEGA328P	1	\$5.63
Módulos Xbee	2	\$95
TOTAL		\$1031.87

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Al finalizar este trabajo monográfico se logró el desarrollo e implementación de un sistema de medición para el monitoreo de diferentes variables como son temperatura, humedad y flujo de aire con comunicación inalámbrica, interfaz gráfica y almacenamiento de datos, de acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados el sistema mostró un buen desempeño.

Conforme a los objetivos planteados al inicio de este proyecto y los resultados que se obtuvieron, se enuncian las siguientes conclusiones:

- Se logró diseñar e implementar los subsistemas de medición para la adquisición de las señales obtenidas de los distintos sensores, además de poder acondicionar dicha señal para poder ser procesada digitalmente.
- Se realizaron pruebas de manera exitosa a cada uno de los subsistemas de medición con el objetivo de comprobar su funcionamiento antes de su instalación en el secador. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química, haciendo uso de un baño térmico como ambiente controlado y utilizando como referencia un termómetro de mercurio.
- Se realizó el diseño e implementación de un sistema de comunicación utilizando los módulos XBee S3B para la transmisión/recepción de los datos entre el módulo de adquisición de datos que está instalado en la azotea del edificio de la FEC y el sistema de control y almacenamiento instalado en el Laboratorio de Procesos de la FIQ.
- Se elaboró exitosamente un sistema de control, visualización e identificación de los datos recibidos de los módulos de adquisición, dicho sistema consta de una HMI y base de datos con el cual, los estudiantes de la FIQ pueden gestionar fácilmente el sistema
- .

- Se elaboró una base de datos donde las lecturas de los sensores son almacenadas con la fecha y hora de la muestra, haciendo uso del software Excel los datos son mostrados al usuario en orden cronológico e identificados según la nomenclatura propuesta para su identificación y posterior evaluación.
- Se concretó la evaluación del funcionamiento del sistema una vez instalado en el secador para estudiar su desempeño, detectar posibles errores y realizar las correcciones correspondientes. Finalmente, se realizó una prueba que tuvo una duración de 4 días en los cuales se pudo verificar el cumplimiento de los requerimientos y especificaciones establecidas.

Recomendaciones

El Sistema que se ha desarrollado en este trabajo monográfico cumple con todos los objetivos propuestos al inicio de este, ya que logra monitorear las variables solicitadas y enviarlas de forma inalámbrica para su procesamiento y almacenamiento, además cuenta con una interfaz HMI, donde se controla el proceso de monitoreo y se establece el tiempo de muestreo. Sin embargo, a continuación se hace mención de algunas mejoras con el objetivo de obtener un próximo prototipo con mayor rendimiento y prestaciones, es por tal razón que se hacen las siguientes recomendaciones dirigidas a los estudiantes de ingeniería electrónica y/o terceros que deseen seguir con esta investigación.

- Rediseñar el puente de Wheatstone para reducir el excesivo consumo de corriente en los divisores de voltaje.
- Elaborar las PCB utilizando un tercero especializado en la fabricación de estos para optimización de espacio, aumentar la durabilidad de las mismas, lograr un acabado profesional y prevención de errores.
- Rediseñar los circuitos de acondicionamiento de señal utilizando amplificadores operacionales y de instrumentación que sean rail to rail, para evitar el uso de distintos niveles de voltajes y fuentes bipolares de esta forma se optimizan los circuitos de acondicionamiento y fuente de alimentación.
- Rediseñar la interfaz de usuario para que muestre los datos obtenidos directamente en ella, sin hacer uso de Excel o sustituirlo por Power BI.
- Diseñar un sistema de alimentación y respaldo aprovechando energía solar ya que el secador en todo momento está expuesto a esta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abderrahmane, A. (2015). A experimental study of air heating plane solar panels as used in drying papayes. *Science Journal of Energy Engineering*, 3(3), 23-32. <https://doi.org/10.11648/j.sjee.20150303.12>
- Agrawal, A., & Sarviya, R. M. (2016). A review of research and development work on solar dryers with heat storage. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(6), 583-605. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.930464>
- Aosong Electronics. (2019, Febrero 22). *Digital temperature and humidity sensor AM2315 Product Manual*. Retrieved from <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/AM2315.pdf>
- Aragonés, J. B., Gómez, C. G., Zaragozí, B. Z., Martínez, A. G., Campos, D. M., & Llinares, A. G. (2003). *Sensores de temperatura*. Retrieved from <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6629/78932.pdf>
- Bal, L. M., Satya, S., & Naik, S. N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2298-2314. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.014>
- Baniasadi, E., Ranjbar, S., & Boostanipour, O. (2017). Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 112, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.043>
- Batubara, F., Dina, S. F., Kathryn, K., Turmuzi, M., Siregar, F., & Panjaitan, N. (2017). Effect of openings collectors and solar irradiance on the thermal efficiency of flat plate-finned collector for indirect-type passive solar dryer. <https://doi.org/10.1063/1.4985528>

- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>
- Bentley, J., & Vega, J. (1993). *Sistemas de medición: Principios y aplicaciones*. México: Compañía Editorial Continental.
- Bergman, H. (2001). *Improvement of a solar dryer for ginger in Nicaragua*. Kungliga Tekniska Hogskolan, Estocolmo.
- Bergqvist, K., & Lindstrom, C. (1999). *Evaluation of a hybrid drier for ginger in Nicaragua*. Kungliga Tekniska Hogskolan, Suecia.
- Bernemyr, M. (2001). *Energy storage in a solar collector using paraffin as phase change material*. Kungliga Tekniska Hogskolan, Suecia.
- Brace Research Institute. (1975). *A survey of solar agricultural dryers*. Canada: Macdonald College of McGill University.
- Carletti, E. (2007). *Comunicación - Bus I2C*. Robots Argentina.
- Castillo, R., & Johanning, D. (2016). Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural. *Programa de Ingeniería Estructural No. 2, 1*. Retrieved from https://163.178.106.6/repositorio/bitstream/handle/50625112500/746/Volumen%201_N2.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chaparro Riveros, J. C. (2018). *Sistema de medición de temperatura para el proceso curado de concreto*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Retrieved from https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/57459/TG_1739_Sistema%20de%20medicion%20de%20temperatura_Chaparro.pdf?sequence=1

- Chero, M. S., & Roman, J. E. (2013). Diseño e implementación de sensores para el monitoreo de variables climatológicas usando un Microcontrolador. V Congreso Iberoamericano SOCOTE.
- Cobo, A., Gómez, P., Pérez, D., & Rocha, R. (2005). *PHP y MySQL. Tecnologías para el desarrollo web*. Ediciones Diaz de Santos.
- Corona, L., Abarca, G., & Carreño, J. (2014). *Sensores y actuadores* (Primera ed.). Mexico D.F.: Grupo Editorial Patria.
- Cortez, C., & Cisne, J. (2014). *Estudio de un secador solar indirecto por convección natural para el deshidratado de frutas y vegetales en Nicaragua*. Universidad Autónoma de Nicaragua, Nicaragua. Retrieved from <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/7595>
- Delgado, T., & Lezcano, J. (2020). *Diseño y Evaluación de un secador solar mixto con material de cambio de fase para acumular energía térmica*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- Díaz, B. (2015). *UART. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Retrieved from https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23730/TFG_Borja_Diaz_Mulas.pdf
- Digi International. (2017). *¿Qué es XBee?* Retrieved from <https://xbee.cl/que-es-xbee/>
- Echavarría, J. (2007). *Estudio de anemómetros de varilla caliente*. Universidad de los Andes, Bogotá. Retrieved from <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23165/u281763.pdf?sequence=1>

- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy conversion and management*, 40(6), 615-655.
- Enibe, S. (2002). Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renewable Energy*, 27(1), 69-86.
- ERAY. (n.d.). *ERAY Digital Anemometer Handheld Wind Speed Gauge Air Velocity Flow Volume Meter with Backlight LCD Display*. Retrieved from <https://www.erayvip.com/eray-digital-anemometer-wind-speed-gauge-handheld-air-velocity-flow-volume-meter-with-backlight-lcd-display-suitcase-and-battery-included-p0059-p0059.html>
- Ezeike, G. O. (1986). Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system. *Energy in agriculture*, 5(1), 1-20. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0167-5826\(86\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0167-5826(86)90002-1)
- Forson, F., Nazha, M., Akuffo, F., & Rajakaruna, H. (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*, 32(14), 2906-2319. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.003>
- Foster, S. (2013). *Construction and performance testing of a mixed mode solar food dryer for use in developing countries*. Brigham Young University. Retrieved from <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/3442/>
- Huircán, J. I. (2007). *Conversores Análogo-Digital y Digital-Análogo: Conceptos Básicos*. Retrieved from <https://www.academia.edu/download/40389335/ad03.pdf>
- Ihaddadene, N., Ihaddadene, R., & Mahdi, A. (2014). Effect of Glazing Number on the Performance of a Solar Thermal Collector. *The fifth International Renewable Energy Congress (IREC)*, (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6826912>

- Jaén, M. (2013). Anemómetros sónicos y de cazoletas: dos instrumentos distintos en nuestra red de observación. *Tiempo y Clima*, 31. Retrieved from <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/download/142/147>
- Jain, D., & Tewari, P. (2015). Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy*, 80, 244-250. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012>
- Kassar, S. (2009). *Anemometría marciana, anemómetro térmico*. Universitat Politècnica de Catalunya , Barcelona.
- Ketelhöhn, N. (2012). *Estrategia de competitividad para la agricultura en Nicaragua*. Retrieved from <http://www.estrategiaynegocios.net/centroamericaymundo/centroamerica/nicaragua/474122-330/estrategia-de-competitividad-para-la-agricultura-en-nicaragua>
- Kouro, S. (2001). *Sensores de humedad*. Universidad técnica Federico Santa María. Retrieved from <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6629/78914.pdf>
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>
- Ludeña, L. (2019). *Diseño e implementaación de un túnel de viento de circuito abierto para una mejor exactitud en la calibración de anemómetros*. Universidad Tecnológica del Perú, Lima. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2377>
- Mayné, J. (2003). Sensores acondicionadores y procesadores de señal. *Reporte técnico Silica-Avnet, Madrid*.

- Mustayen, A. G., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>
- Pakhare, V., & Salve, S. (2016). Design and Development of Solar Dryer Cabinet with Thermal Energy Storage for Drying Chillies. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5, 358-362.
- Pallás, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal* (Cuarta ed.). Barcelona: Marcombo.
- Pallas-Areny, R., & Webster, J. G. (2012). *Sensors and signal conditioning*. John Wiley & Sons.
- Pérez, A., & Real, O. (2012). *Efecto del presecador solar tipo domo en el secado de granos de café orgánico (Coffea arabica L.), en fincas de pequeños productores de las cooperativas San Isidro R.L Boaco y PROCOSER Nueva Segovia. Noviembre 2010- Febrero 2011*. Universidad Nacional Agraria, Nicaragua. Retrieved from <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/2771>
- Pérez, E. M. (2007). *Microcontroladores PIC: sistema integrado para el autoaprendizaje*. España: Marcombo.
- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). Solar Drying Technology. 640. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4>
- Rivas, J. (1999). *Diseño y estimación de costos de un secador híbrido para jengibre*. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- Rodríguez, E., Ocampo, J., & Ortega, C. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectrónicos. *Scientia et Technica*, 1(34). Retrieved from <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/download/5509/3181>

- Rodríguez, P. (2006). *Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI)*. Instituto de Electricidad y Electrónica - Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Rojas, A., Solano, M., & Tunjano, D. (2011). Usando el protocolo de comunicación serial síncrono SPI en la implementación de instrumentación digital. *Revista Matices Tecnológicos*, 3, 57-63.
- Saxena, A., Agarwal, N., & Srivastava, G. (2013). Design and performance of a solar air heater with long term heat storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60, 8-16.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.12.044>
- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Texas Instruments. (1999). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2013, Octubre 18). *Anemometer*. Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/anemometer>
- Tiris, C., Ozbalta, N., Tiris, M., & Dincer, I. (1994). Experimental Testing of a New Solar Dryer. *International Journal of Energy Research*, 18, 483-490.
- Tiwari, A. (2016). A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. *Journal of Food Processing & Technology*, 7(9). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000623>
- Valdés, F., & Pallas, R. (2007). *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC* (Primera ed.). España: Marcombo.

Anexo A. Carta de propuesta del proyecto

Managua, Jueves 20 diciembre 2018

Ing. Alvaro Antonio Gaitán
Departamento de Electrónica
Facultad de Electrotecnia y Computación

Estimado Ing. Gaitán,

me dirijo a usted para proponerle la realización de un trabajo monográfico en su campo, en asociación con un trabajo monográfico de Ingeniería Química que se encuentra en ejecución.


En el caso de Ingeniería Química el tema corresponde al "Diseño y Evaluación de un Secador Solar Mixto con Material de Cambio de Fase para Acumular Energía Térmica". A la fecha se ha avanzado en la etapa de diseño; el equipo ya se está construyendo y probable esté finalizado a mediados de enero 2019.

En la etapa de evaluación se deberá determinar el rendimiento térmico del colector solar así como la eficiencia del equipo de secado. Para ello se necesita la recolección continua (durante el día y la noche), de los siguientes parámetros: temperatura, humedad y velocidad del aire fuera y dentro del equipo; temperatura de superficies del equipo; temperatura del material de cambio de fase; así como intensidad de la radiación solar incidente.

Requerimos de su apoyo para desarrollar un sistema de medición y almacenamiento de dichos parámetros. Las dos tesis que realizan este tema monográfico han conversado con estudiantes de la FEC y a este momento han mostrado interés en trabajar los siguientes dos estudiantes de Ingeniería Electrónica:

- Sergio Marcelo Zepeda Irigoyen, carné UNI 2013-61975; y
- Jocsan Haniel Castillo Carranza, carné UNI 2013-60953.

En espera de su respuesta, me despido atentamente


MSc Ing. Rodolfo A. Espinoza Morales
Departamento de Operaciones Unitarias
Facultad de Ingeniería Química

cc: Archivo

Anexo B. ACTA DE REQUERIMIENTOS

Managua, viernes 15 de noviembre del 2019

Se propuso la realización de un trabajo monográfico en el campo de Electrónica en asociación con un tema monográfico de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), llamado “Diseño y Evaluación de un Secador Solar Mixto con Material de Cambio de Fase para Acumular Energía Térmica”, dentro de los alcances de esta investigación se encuentra la evaluación del secador desarrollado, por lo que se deben obtener mediciones de temperatura, humedad relativa y flujo de aire en 23 puntos del secador, por al menos 4 días para su posterior análisis. Debido a esto, los bachilleres Sergio Marcelo Zepeda Irigoyen, con carné 2013-61975 y Jocsan Haniel Castillo Carranza, con carné 2013-60953, de la Facultad de Electrotecnia y Computación (FEC) propusieron el “Desarrollo de un sistema Electrónico para el monitoreo en tiempo real de un secador solar mixto con material de cambio de fase, para la Facultad de Ingeniería Química (FIQ)”, este se debe regir bajo los siguientes parámetros:

1. Los sensores dedicados a medir la temperatura del aire en el secador deben tener un rango de trabajo que comprenda los 0 °C a 100 °C con una precisión de 0.5 °C.
2. Se debe medir la temperatura y humedad relativa a la entrada y salida de aire del secador. El rango de trabajo para la temperatura debe ser de 0 °C a 100 °C y la humedad relativa de 0 a 99.
3. Se debe medir el flujo de aire en las entradas del secador y mostrar los datos obtenidos en metros sobre segundos.
4. Debido a la cantidad de sensores a utilizar se requiere el uso de ADC externos para cubrir la demanda de canales ADC y reducir el uso de recursos del microcontrolador.
5. Para el control del sistema, almacenamiento y visualización de datos se utilizará una PC instalada en el Laboratorio de Procesos de la FIQ.

6. La PC donde se almacenarán los datos debe contar con una interfaz de usuario para dar inicio y detener el proceso de medición. Además de poder establecer el tiempo de muestreo mediante las siguientes opciones preprogramadas: 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 segundos.
7. Los datos de las mediciones se deben guardar con la fecha y hora que la muestra fue tomada.
8. Los datos se deben poder exportar a Microsoft Excel para su posterior análisis.
9. El gabinete donde se instalarán los equipos en el secador no debe filtrar humedad y que no interfiera con la comunicación entre los equipos.

Sin más asuntos que tratar.

Br. Sergio Marcelo Zepeda
Estudiante FEC

Br. Jocsan Haniel Castillo
Estudiante FEC

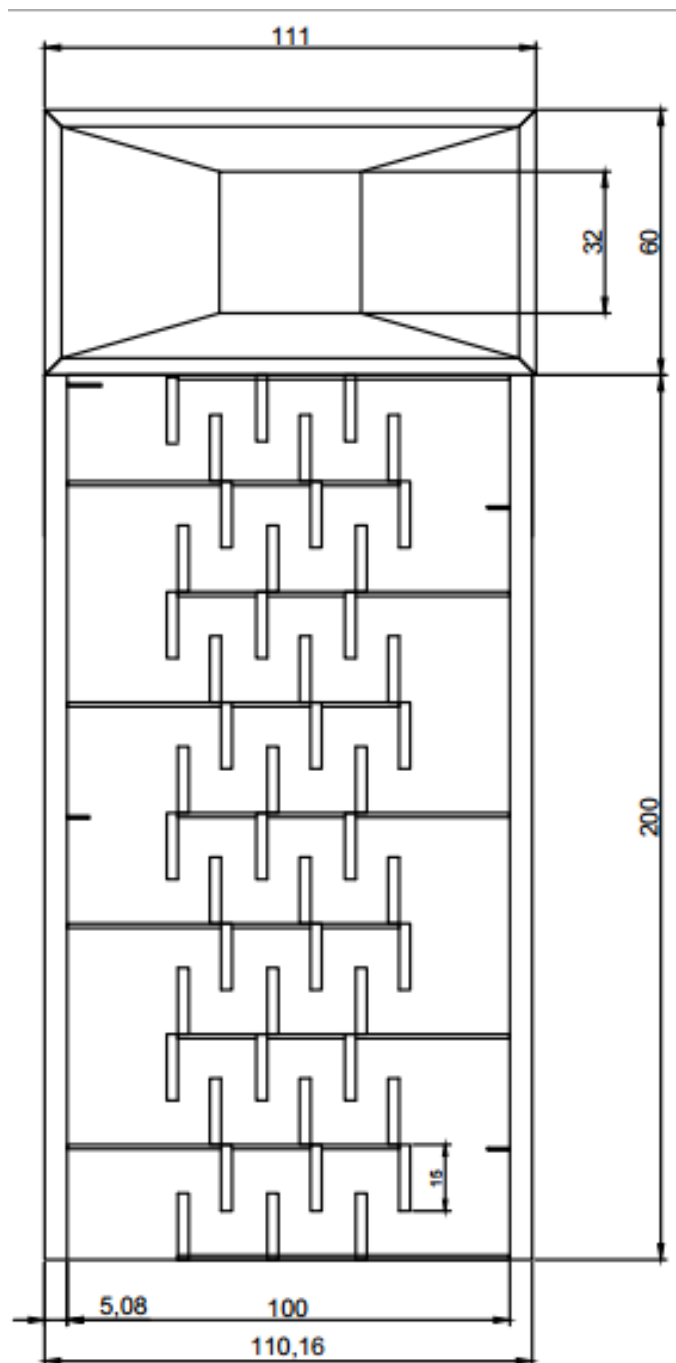
Br. Tania Lisbeth Delgado
Estudiante FIQ

Br. Janella Lisseth Lezcano
Estudiante FIQ

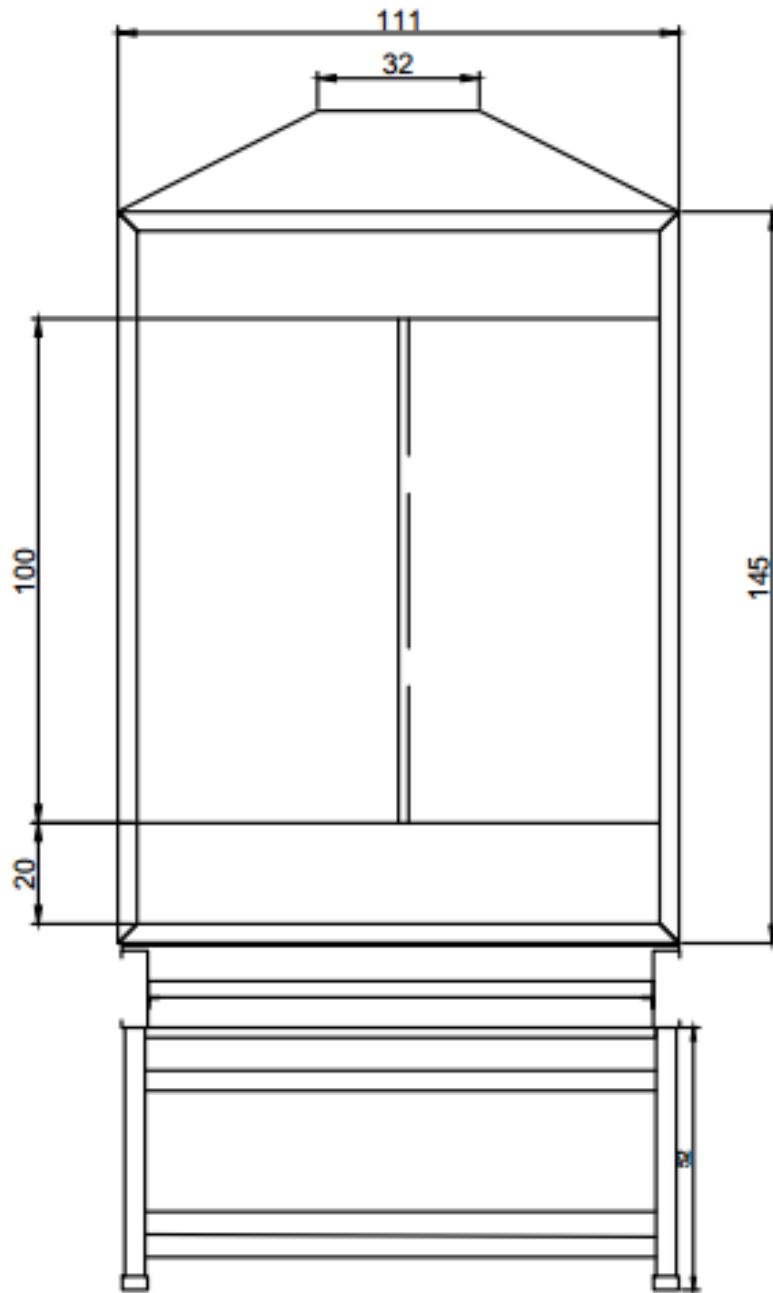
Anexo C. Vistas del Secador Solar

Anotaciones en centímetros.

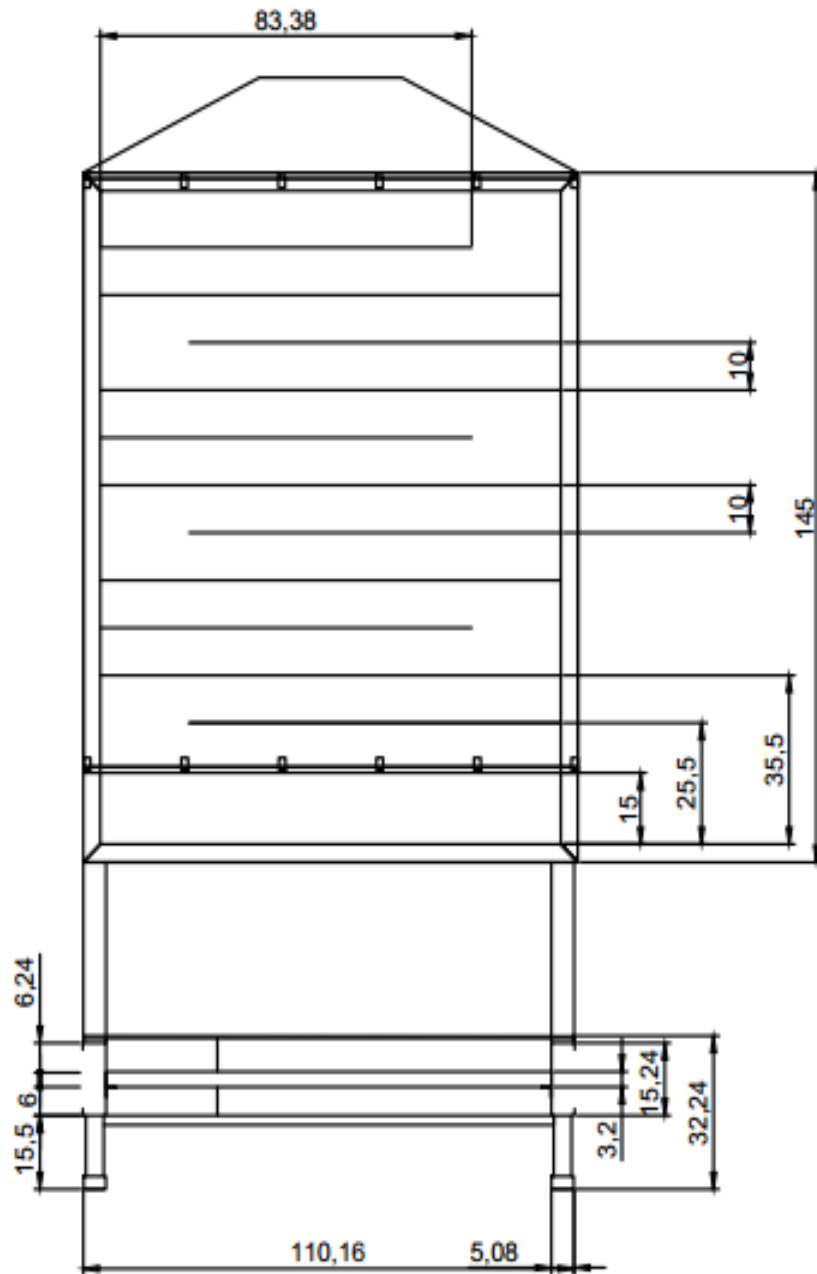
Vista Superior Secador Solar



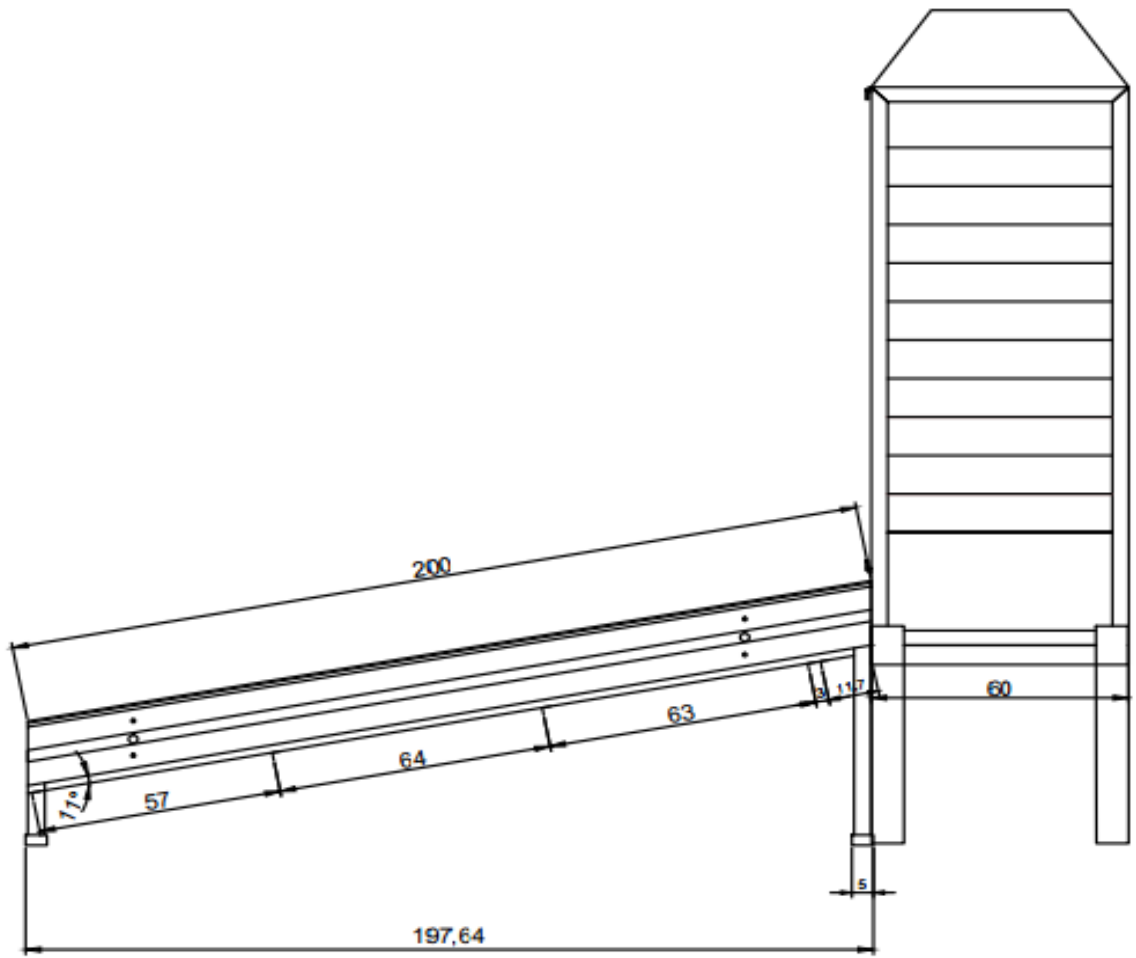
Vista Posterior Secador Solar



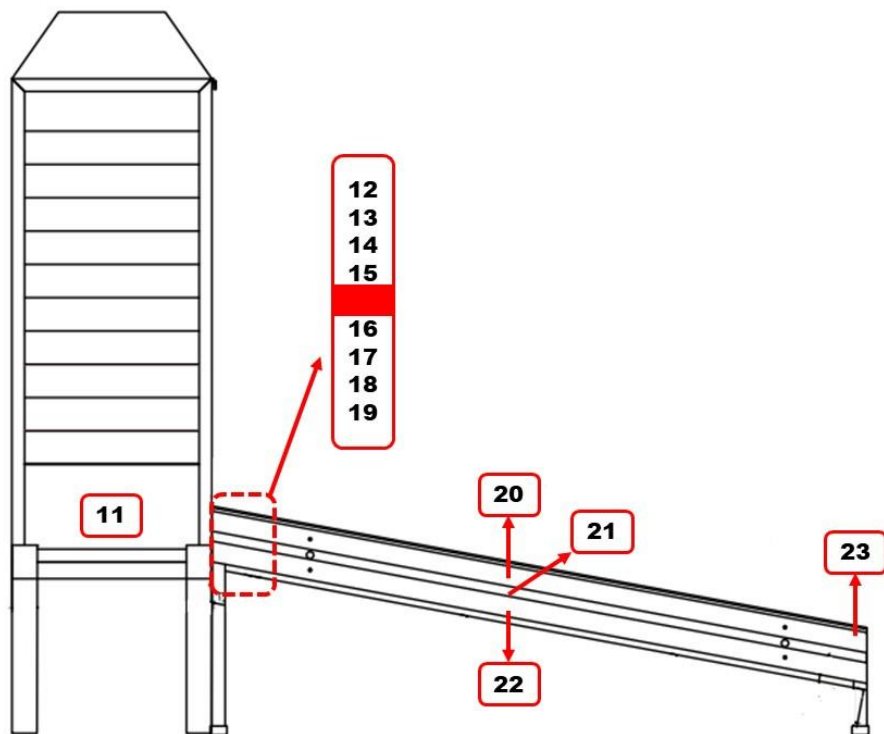
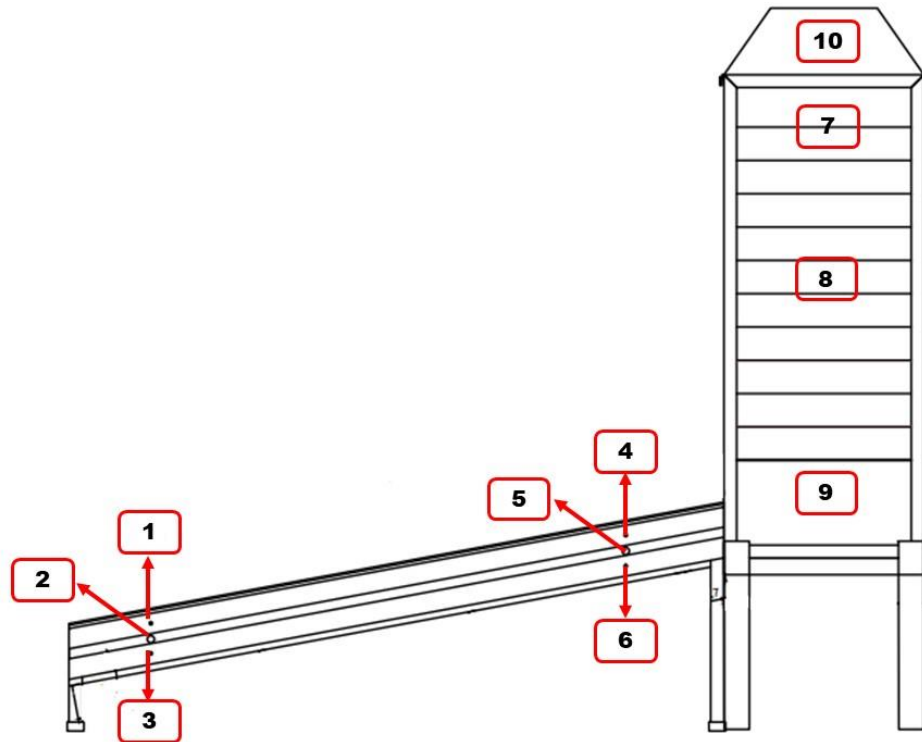
Vista Frontal Secador Solar



Vista Lateral Izquierda



Anexo D. Planos de la ubicación de los sensores



Anexo E. Descripción de los sensores

Descripción de los tipos de sensores y su ubicación

No.	Variable	Tipo de sensor	Ubicación
1	Temperatura	LM35	Inicio colector superior
2	Temperatura	RTD	Inicio colector parafina
3	Temperatura	LM35	Inicio colector inferior
4	Temperatura	LM35	Final colector superior
5	Temperatura	RTD	Final colector parafina
6	Temperatura	LM35	Final colector superior
7	Temperatura	LM35	Cámara de secado superior
8	Temperatura	LM35	Cámara de secado intermedio
9	Temperatura	RTD	Parafina cámara de secado
10	Temperatura y Humedad	AM2315	Extractor de aire
11	Temperatura	LM35	Cámara de secado inferior
12	Temperatura	RTD	Superficie de vidrio
13	Temperatura	LM35	Salida colector superior a cámara de secado
14	Temperatura	LM35	Salida colector superior a cámara de secado

15	Temperatura	RTD	Superficie colector superior
16	Temperatura	RTD	Superficie colector inferior
17	Temperatura	LM35	Salida colector inferior a cámara de secado
18	Temperatura	LM35	Salida colector inferior a cámara de secado
19	Temperatura	RTD	Superficie inferior
20	Temperatura	LM35	Intermedio colector superior
21	Temperatura	RTD	Intermedio colector parafina
22	Temperatura	LM35	Intermedio colector inferior
23	Temperatura y humedad	AM2315	Entrada de aire

Anexo F. Hoja de datos LM35

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full -55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V
- Less Than 60-μA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Non-Linearity Only ±¼°C Typical
- Low-Impedance Output, 0.1 Ω for 1-mA Load

2 Applications

- Power Supplies
- Battery Management
- HVAC
- Appliances

3 Description

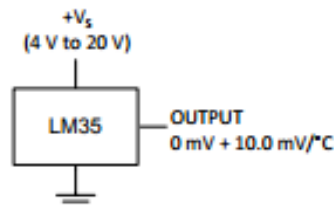
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature devices with an output voltage linearly-proportional to the Centigrade temperature. The LM35 device has an advantage over linear temperature sensors calibrated in Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 device does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±½°C over a full -55°C to 150°C temperature range. Lower cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low-output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 device makes interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 device draws only 60 μA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 device is rated to operate over a -55°C to 150°C temperature range, while the LM35C device is rated for a -40°C to 110°C range (-10° with improved accuracy). The LM35-series devices are available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D devices are available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D device is available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

Device Information⁽¹⁾

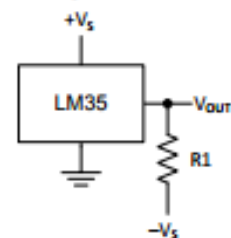
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM35	TO-CAN (3)	4.699 mm × 4.699 mm
	TO-92 (3)	4.30 mm × 4.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.91 mm
	TO-220 (3)	14.986 mm × 10.16 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Full-Range Centigrade Temperature Sensor



AD620

THEORY OF OPERATION

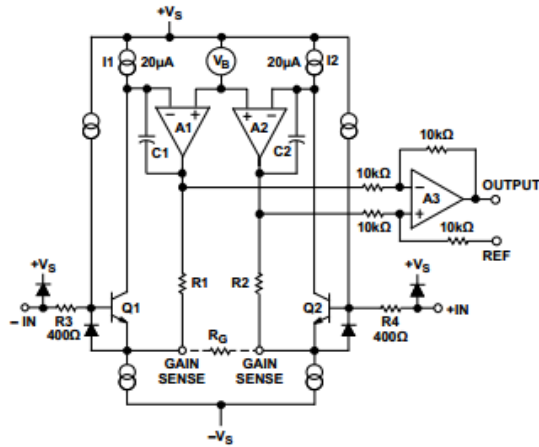


Figure 36. Simplified Schematic of AD620

The AD620 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three op amp approach. Absolute value trimming allows the user to program gain *accurately* (to 0.15% at $G = 100$) with only one resistor. Monolithic construction and laser wafer trimming allow the tight matching and tracking of circuit components, thus ensuring the high level of performance inherent in this circuit.

The input transistors Q1 and Q2 provide a single differential-pair bipolar input for high precision (Figure 36), yet offer 10× lower input bias current thanks to SuperBeta processing. Feedback through the Q1-A1-R1 loop and the Q2-A2-R2 loop maintains constant collector current of the input devices Q1 and Q2, thereby impressing the input voltage across the external gain setting resistor R_G . This creates a differential gain from the inputs to the A1/A2 outputs given by $G = (R1 + R2)/R_G + 1$. The unity-gain subtractor, A3, removes any common-mode signal, yielding a single-ended output referred to the REF pin potential.

The value of R_G also determines the transconductance of the preamp stage. As R_G is reduced for larger gains, the transconductance increases asymptotically to that of the input transistors. This has three important advantages: (a) Open-loop gain is boosted for increasing programmed gain, thus reducing gain related errors. (b) The gain-bandwidth product (determined by C1 and C2 and the preamp transconductance) increases with programmed gain, thus optimizing frequency response. (c) The input voltage noise is reduced to a value of $9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, determined mainly by the collector current and base resistance of the input devices.

The internal gain resistors, R1 and R2, are trimmed to an absolute value of 24.7 kΩ, allowing the gain to be programmed accurately with a single external resistor.

The gain equation is then

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

Anexo I. Datos de velocidad y RPM del anemómetro en túnel de viento

Datos de velocidad y RPM del anemómetros en un túnel de viento

RPM	Velocidad [m/s]
455	1.48
505	1.58
535.5	1.64
562.75	1.7
650	1.84
756	2.1
901.5	2.41
1005.25	2.61
1161	2.86
1251.75	3.11
1427	3.33
1561.5	3.66
1689.75	3.91
1833.75	4.16
1956	4.47
2100.25	4.75
2241.75	5

2370	5.25
2496.5	5.49
2621.75	5.78
2737.75	6.02
2848	6.16
2979.25	6.45

Anexo J. Tabla asignación de pines para el microcontrolador

Asignación de pines para el microcontrolador ATMEGA328P

Numero de pin	Nombre de pin	Descripción
1	PC6	MCLR
2	PD0	RX Puerto Serie
3	PD1	TX Puerto Serie
4	PD2	Interrupción Anemómetro 2
5	PD3	Interrupción Anemómetro 1
6	PD4	Led de Estado
7	VCC	
8	GND	
9	PB6	
10	PB7	
11	PD5	Conmutación sensor de humedad 2
12	PD6	Conmutación sensor de humedad 1
13	PD7	SPI / CS2
14	PB0	
15	PB1	SPI / CS1
16	PB2	SPI / CS
17	PB3	SPI / MOSI

18	PB4	SPI / MISO
19	PB5	SPI / CLK
20	AVCC	
21	VREF	
22	GND	
23	PD0	
24	PD1	
25	PD2	
26	PD3	
27	PD4	I2C / SDA
28	PD5	I2C / SCL

Anexo K. Hoja de datos fuente conmutada S-120-12

Mulview

SWITCH POWER SUPPLY

120W single output switching power supply

S-120 series



■ Features

- ✚ Low price and high reliability
- ✚ AC input power suitable for the world
- ✚ High efficiency and low operation temperature
- ✚ Soft-start current can reduce the AC input impact effectively
- ✚ With Short-circuit and overload protection
- ✚ 100% full-load burning test
- ✚ Installed with EMI filter, minimum wave.
- ✚ 2 years warranty

■ Specification

Model Specification	S-120-5	S-120-7.5	S-120-12	S-120-15	S-120-24	S-120-27	S-120-48
DC output voltage	5V	7.5V	12V	15V	24V	27V	48V
Output voltage error (Note: 2)	±2%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%
Rated output current	20A	15A	10A	8A	5A	4.4A	2.5A
Output current rage	0-25A	0-16A	0-10A	0-8A	0-5A	0-4.4A	0-2.5A
Wave and noise(Note : 3)	100mVp-p	100mVp-p	100mVp-p	100mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	120mVp-p
Inlet stability(Note : 4)	±0.5%	±0.5%	±0.3%	±0.3%	±0.2%	±0.2%	±0.2%
Load stability (Note : 5)	±0.5%	±0.5%	±0.3%	±0.3%	±0.2%	±0.2%	±0.2%
DC output power	100W	112.5W	120W	120W	120W	118.8W	120W
Efficiency	78%	80.5%	80.5%	81%	83.5%	82%	83.5%
Adjustable range for DC voltage	4.5~5.5V	6~8.3V	10.6~13.2V	13.2~16.5V	21~28V	24.5~29.5V	43.2~52.8V
AC input voltage range	88-132VAC/170-264V AC Selected by switch,47-63Hz; 240-370VDC						
Input current	2.64/115V 1.2A/230A						
AC Inrush current	Cold-start current 30A/115V 60A/230V						
Leakage current	<1mA/240VAC						
Overload protection	105%-150%Type:Foldback:current limiting reset: auto recovery						
Temperature coefficient	±0.03%/°C (0-50°C)						
Setup rise hold up time	100ms,50ms,20ms						
Vibration	10-500Hz,2G 10min,/1cycle. Period for60min. Each axes						
Withstand voltage	Input and output internal: 1.5KVAC,Input and enclosure: 1.5KVAC,Output and enclosure: 0.5KVAC						
Isolation resistance	Input and output internal: Input and enclosure, Output and enclosure: 500VDC/100MΩ						

Anexo L. Nomenclatura de los sensores

Nomenclatura, placa y ubicación de los sensores

ID	Sensor	Ubicación	Placa
A0	LM35	Final colector superior	U1
A1	LM35	Cámara de secado superior	U1
A2	LM35	Salida colector superior a cámara de secado	U1
A3	LM35	Cámara de secado intermedio	U1
A4	LM35	Final colector inferior	U1
A5	LM35	Salida colector inferior a cámara de secado	U1
A6	LM35	Salida colector superior a cámara de secado	U1
A7	LM35	Salida colector inferior a cámara de secado	U1
B0			
B1	LM35	Inicio colector Inferior	U2
B2	LM35	Inicio colector superior	U2
B3			
B4			
B5	LM35	Intermedio colector inferior	U2
B6			
B7	LM35	Intermedio colector superior	U2
D0	RTD PT100	Parafina cámara de secado	U3

D1	RTD PT100	Intermedio colector parafina	U3
D2	RTD PT100	Inicio colector parafina	U3
D3	RTD PT100	Final colector parafina	U3
D4	RTD PT100	Superficie de vidrio	U3
D5	RTD PT100	Superficie colector inferior	U3
D6	RTD PT100	Superficie colector superior	U3
D7	RTD PT100	Superficie inferior	U3
E0	Anemómetro	Flujo de aire superior	U4
E1	Anemómetro	Flujo de aire inferior	U4
F0	AM2315	Temperatura entrada	U4
F1	AM2315	Humedad entrada	U4
F2	AM2315	Temperatura salida	U4
F3	AM2315	Humedad salida	U4

Anexo M. Hoja de datos Julabo SW23

Datos del producto

SW23 Baño de agua con agitación

Los baños de agua con agitación de JULABO convencen en la práctica diaria gracias a los numerosos detalles que los configuran. De esta forma, los restos de agua vuelven a la cubeta de acero inoxidable a través del borde inclinado hacia adentro y de la tapa de la cubeta.



Características del producto

- Rango de temperatura de trabajo desde +20 to +99.9 °C
- Operación sencilla vía teclado
- Pantalla LED brillante
- Diseño contra derrames
- Interruptor principal integrado en el teclado (patentado)
- Alta estabilidad de temperatura de ± 0.2 °C ó ± 0.02 °C
- Protección contra operación con baño seco, con alarmas visual y sonora
- Advertencia y apagado de protección para temperatura alta/baja
- Frecuencias de agitación ajustables desde 20 a 200 RPM's en modelos SW
- Fácil drenaje
- Plataforma de agitación extraíble
- Tapas abatibles y planas (opcional)
- Amplia gama de accesorios para muestras de control de temperatura
- Todos los componentes en contacto con el fluido son de acero inoxidable o plástico de alta calidad

Información técnica

Versiones de tensión disponibles		Baño	
N° Ref.	9 550 323	Cubeta	Acero inoxidable
Versiones de tensión disponibles:		Tapa para cubetas	accesorio
9 550 323.02	115V/60Hz (Nema N5-15 Plug)	Apertura útil de la cubeta cm (W x L / D)	50 x 30 / 18
9 550 323.03	230V/50-60Hz (Schuko Plug - CEE 7/4 Plug Type F)		
9 550 323.04	230V/50-60Hz (UK Plug Type BS1363A)		
9 550 323.05	230V/50-60Hz (CH Plug Type SEV 1011)		
Otros		Electrónica	
Clasificación	Clasificación I (NFL)	Regulación de temperatura	PID1
Clasificación IP	IP 21	Indicador de temperatura	LED
		Ajuste de temperatura	Teclado
Baño de agua		Tamaños y volúmenes	
Dimensión con tapa de baño cm (W x L x H)	70 x 35 x 43	Profundidad de inmersión útil cm	18
Frecuencia de agitación/Frecuencia de agitación ajustable rpm	20 ... 200	Peso kg	20.7
Traza de agitación/Traza de agitación ajustable mm	15	Dimensiones cm (W x L x H)	70 x 35 x 26
		Volumen de llenado l	8 ... 20
Valores de temperatura			
Ajuste de la resolución del indicador de temperatura °C	0.1		
Rango de temperatura de operación °C	+20 ... +99.9		
Estabilidad de temperatura °C	± 0.02		
Temperatura ambiente admisible °C	5 ... 40		

Anexo N. Datos pruebas de laboratorio

Temperatura (°C)	25.10	34.90	50.00	60.10	74.90	Error absoluto
LM35 (A0)	25.18	34.80	50.26	60.24	75.16	0.26
LM35 (A1)	25.16	34.81	49.75	60.21	75.08	0.25
LM35 (A2)	25.12	34.98	50.05	60.13	74.90	0.08
LM35 (A3)	24.86	34.84	49.91	60.19	74.73	0.24
LM35 (A4)	25.27	34.91	50.17	59.80	75.02	0.30
LM35 (A5)	24.86	34.81	49.96	59.81	75.07	0.29
LM35 (A6)	24.80	35.26	50.24	60.04	75.01	0.36
LM35 (A7)	25.01	34.78	50.10	60.23	74.82	0.13
LM35 (B0)	24.79	34.75	50.11	59.72	75.01	0.38
LM35 (B1)	24.86	34.95	50.09	59.75	74.97	0.35
LM35 (B2)	25.28	35.21	50.20	60.13	75.05	0.31
LM35 (B3)	24.99	35.07	50.06	59.84	74.78	0.26
LM35 (B4)	24.90	34.86	49.95	59.74	74.92	0.36
LM35 (B5)	25.07	35.11	50.25	60.08	75.27	0.37
LM35 (B6)	24.88	34.92	50.21	60.09	75.05	0.22
LM35 (B7)	25.19	35.20	50.25	59.90	74.88	0.30
RTD (D0)	25.10	35.01	50.19	59.85	74.81	0.25

RTD (D1)	25.14	34.80	50.08	60.10	74.82	0.10
RTD (D2)	24.97	34.88	49.85	60.17	75.13	0.23
RTD (D3)	24.97	34.81	50.13	60.01	75.14	0.24
RTD (D4)	25.12	35.17	50.17	59.86	75.16	0.27
RTD (D5)	25.07	35.06	49.83	59.83	75.20	0.30
RTD (D6)	25.16	35.04	50.15	59.80	75.04	0.30
RTD (D7)	25.02	34.81	49.82	59.91	75.06	0.19