



Diseño e implementación de un módulo de adquisición de datos para un secador convectivo

Estefanía Cardona Castro

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Agroindustrial

Asesores

Andrés Felipe Castaño Franco, Bioingeniero

Helber Andrés Carvajal Castaño, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Agroindustrial

El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia

2021

Cita	Cardona Castro [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] E. Cardona-Castro, “Diseño e implementación de un módulo de adquisición de datos para un secador convectivo”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia, 2021.



Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

La realización de este trabajo de grado está dedicada especialmente a mis padres Silvia y Emiro, quienes me han apoyado en cada decisión que he tomado y me acompañaron incondicionalmente durante todo este proceso, me enseñaron que la educación es el mejor camino para cambiar el mundo, que con esfuerzo y disciplina todo se puede lograr; este logro es mas de ustedes que mío.

También le dedico este trabajo a mi hermana Carolina, quien siempre me ha apoyado, me ha escuchado y con su ejemplo me ha demostrado que todo es posible. Le dedico este logro a mi abuela Leonor, mi otra madre, gracias por acompañarme siempre incondicionalmente. Finalmente le dedico este logro a toda mi familia, los presentes y los que ya no están, gracias infinitas por todo su apoyo.

Agradecimientos

Gracias a mi Alma Máter, por haberme brindado tantos años de felicidad, enseñanzas y experiencias. Gracias a mis asesores, maestros y amigos: Andrés Felipe Castaño Franco y Helber Andrés Carvajal Castaño, por haber aceptado acompañarme durante todo mi proceso, compartirme todos sus conocimientos y brindarme su apoyo incondicional, indiscutiblemente han marcado mi vida. Agradecimientos especiales a mi amiga Anlly López Betancur, quien incondicionalmente me presto su amistad, apoyo y conocimiento para la realización de mi proyecto. Gracias infinitas a mis amigos Alexandra Echeverri, Juliana Cardozo y Daniel Otalvaro, por su apoyo y acompañamiento durante toda mi estadía académica, compañeros de alegrías, tristezas y conocimientos, hicieron de la Universidad mi segundo hogar. Gracias a la Coordinación de mi programa y los laboratorios de la Universidad por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo. Al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) y la Facultad de Ingeniería quienes a través del fondo de apoyo para trabajos de grado permitieron la realización de este trabajo de grado.

Finalmente, gracias especiales a todos mis compañeros, profesores y cada persona de la Universidad que hizo posible la realización de este logro.

Gracias a todos ustedes porque me han ayudado a convertirme en la persona que soy hoy.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. OBJETIVOS.....	12
III. MARCO TEÓRICO	13
IV. METODOLOGÍA	19
A. Desarrollo sistema electrónico de adquisición de datos.....	20
1. Desarrollo de los sistemas electrónicos de sensado de temperatura y masa.....	20
2. Diseño y montaje de la tarjeta electrónica.....	20
3. Pruebas y ajustes.....	20
B. Diseño interfaz gráfica de visualización	21
1. Identificación de los parámetros que deben ser presentados en la interfaz gráfica.....	21
2. Realización del montaje de la interfaz gráfica en el sistema operativo de la Raspberry PI.	21
C. Diseño y ensamble del módulo de adquisición de datos.....	22
D. Implementación protocolo VNC y transmisión remota de datos	23
E. Comparación y validación estadística del módulo de adquisición de datos respecto a la metodología tradicional	23
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
A. Sistema electrónico de adquisición de datos	24
Sensado de temperatura:	24
Sensado de masa:	24
B. Diseño y montaje de la tarjeta electrónica	26
C. Diseño interfaz gráfica de visualización	27

Pestaña principal:	27
Pestaña gráficas velocidad de secado:	28
Pestaña gráficas % humedad:.....	29
D. Implementación protocolo VNC y transmisión remota de datos	30
E. Diseño y ensamble del módulo de adquisición de datos.....	32
F. Comparación y validación estadística del módulo de adquisición de datos respecto a la metodología tradicional	35
VI. CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS	38
ANEXOS	39
A. Código y diseño módulo	39

LISTA DE TABLAS

TABLA I MANDOS DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	21
TABLA II CONDICIONES DE LOS EXPERIMENTOS DE SECADO.....	35
TABLA III RESULTADOS PRUEBAS DE VALIDACIÓN ESTADISTICA	36

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Configuración celdas de carga.	16
Fig. 2. Amplificador de celda de carga HX711	17
Fig. 3. Termocupla tipo K.....	17
Fig. 4. Configuración MAX6675	18
Fig. 5. Metodología	19
Fig. 6. Secciones de la interfaz gráfica del módulo de adquisición de datos.....	22
Fig. 7. Conexiones Raspberry Pi - MAX6675	24
Fig. 8. Conexiones Raspberry Pi – HX711.....	25
Fig. 9. Procedimiento para calibrar celda de carga	25
Fig. 10. Diseño circuito tarjeta universal.....	26
Fig. 11. Diseño tarjeta universal en SpaceClaim	26
Fig. 12. Tarjeta universal ensamblada.....	27
Fig. 13. Diseño sección principal interfaz	27
Fig. 14. Sección principal de la interfaz gráfica.....	28
Fig. 15. Diseño sección gráficas velocidad de secado.....	28
Fig. 16. Sección gráficas velocidad de secado	29
Fig. 17. Diseño sección gráficas % humedad	29
Fig. 18. Sección gráficas % humedad.....	30
Fig. 19. Interfaz a través de protocolo VNC	31
Fig. 20. Interfaz a través de Google Meet.....	31
Fig. 21. Diseño de la caja del módulo	32
Fig. 22. Diseño y ensamble de la caja del módulo con componentes	32
Fig. 23. Diseño y ensamble de la caja del módulo lateral	33
Fig. 24. Diseño y montaje de la caja del módulo parte posterior.....	33
Fig. 25. Diseño y ensamble de la caja del módulo parte frontal	33
Fig. 26. Soporte del módulo de adquisición	34
Fig. 27. Módulo de adquisición de datos ubicado en el equipo de secado	34
Fig. 28. Curvas de secado experimentales analíticas y automatizadas.....	35

RESUMEN

En la Universidad de Antioquia – Seccional Oriente se encuentra disponible un secador de túnel convectivo, el cual es utilizado para estudiar el fenómeno de secado. La operación de secado es una de las más importantes en la agroindustria alimentaria, utilizada para evaluar la humedad de un material o el retiro de la misma. Actualmente en el estudio de este fenómeno la adquisición de datos opera de forma manual, lo que implica que se debe permanecer el tiempo que dure el experimento (3-4 horas) registrando los datos, lo cual puede conducir a errores asociados al registro y a la duración del experimento. Con este trabajo se buscó sustituir la toma de datos manual, automatizando el registro de los datos del secador con un módulo de adquisición de datos.

El módulo de adquisición cuenta con las siguientes características: presenta en la interfaz gráfica las variables involucradas en la operación de secado: temperaturas de cabina y ductos de ventilación, masa y tiempo de operación; realiza curvas importantes en el fenómeno de secado; permite guardar datos y gráficas, todo en un diseño amigable que permite una fácil interacción entre la máquina y el usuario. Este módulo a su vez permite la transmisión remota de datos para lo que se requiere una conexión estable a internet.

Para validar el funcionamiento del módulo de adquisición de datos, se realizó una validación cruzada que incluyó pruebas manuales y pruebas automatizadas a 40 y 50°C. Por último, los resultados obtenidos se validaron estadísticamente y se comprobó que el uso del módulo permite disminuir los errores asociados al proceso de adquisición de datos manual.

Palabras clave — Secado, curva de secado, adquisición de datos, automatizar, interfaz gráfica, transmisión remota de datos.

ABSTRACT

A convective tunnel dryer is available at the Universidad de Antioquia - Seccional Oriente, which is used to study the drying phenomenon. The drying operation is one of the most important in the food agroindustry, used to evaluate the moisture of a material or its removal. Currently, in the study of this phenomenon, data acquisition operates manually, which implies that the time that the experiment lasts (3-4 hours) must be spent recording the data, causing that associated errors may occur in this record due to the duration of the experiment. The aim of this work was to replace manual data acquisition by automating the recording of data from the dryer with a data acquisition module.

The acquisition module has the following characteristics: it presents in the graphic interface the variables involved in the drying operation: cabin and ventilation duct temperatures, mass, and operation time; it performs important curves in the drying phenomenon; it allows saving data and graphs, all in a friendly design that allows an easy interaction between the machine and the user. This module also allows remote data transmission for which a stable internet connection is required.

To validate the performance of the data acquisition module, a cross validation was performed that included manual tests and automated tests at 40 and 50°C. Finally, the results obtained were statistically validated and it was found that the use of the module reduces the errors associated with the manual data acquisition process.

***Keywords* — Drying, drying curve, data acquisition, automation, graphical interface, remote data transmission.**

I. INTRODUCCIÓN

En la agroindustria, una de las aplicaciones más importantes es el uso de las operaciones unitarias como: transferencia de calor, transferencia masa, mecánica de fluidos y operaciones con sólidos. Entre estas operaciones unitarias se encuentra el secado, que consiste en la remoción de la humedad de una materia prima. Tradicionalmente el estudio de la operación de secado se realiza a través de mediciones de pérdida de masa del producto durante el tiempo, de tal manera que, posteriormente se realizan los correspondientes cálculos y gráficas de secado. Estos experimentos son complejos debido a que requieren el seguimiento manual de la pérdida de masa por largos periodos de tiempo, el registro manual de los datos y el evidente error humano que se incorpora a la información generada [1]. Además, los laboratorios de este tipo también presentan limitaciones relacionadas con el espacio, lo cual limita el número de personas que pueden realizar este tipo de experimentos. Debido a esto, se ha visto la necesidad de utilizar otro tipo de herramientas que permitan mejorar el proceso de estudio de la operación de secado.

La simulación computacional de procesos e implementación de interfaces informáticas permiten mejorar el proceso de estudio de cualquier tipo de operación o fenómeno. El primero a pesar de que simula el fenómeno, sigue presentando ciertas limitaciones, ya que este reproduce de manera “artificial” la operación unitaria a través de modelos matemáticos, por lo que no representa el fenómeno real. Por su parte, el segundo permite la automatización y análisis de datos de manera computarizada, en tiempo real y, además, la opción de transmitir remotamente los datos. De acuerdo con lo anterior, este trabajo se orientó en el diseño y montaje de un módulo de adquisición de datos en tiempo real para el fenómeno de secado, específicamente para el secador de túnel convectivo que se encuentra en la Universidad de Antioquia – Seccional Oriente, buscando mejorar el proceso de adquisición de los datos, los análisis del fenómeno y disminuir algunos de los errores que se presentan en este tipo de experimentos, ya que este equipo se utiliza frecuentemente con fines académicos y de investigación.

El diseño del módulo de adquisición de datos se dividió en tres partes principales: sistemas de sensado, interfaz gráfica y diseño - ensamble físico del módulo. Los sistemas de sensado se realizaron a través de termocuplas y celdas de carga con sus respectivos módulos. Como unidad de

control se utilizó un ordenador de placa reducida Raspberry Pi en la que se encuentran los algoritmos de control y el código principal de la interfaz. Por su parte la interfaz gráfica de usuario fue implementada en el sistema operativo de la Raspberry Pi, utilizando el lenguaje de programación Python y la librería PyQt5. Para el diseño del módulo físico se utilizó el programa de diseño y modelado SpaceClaim, donde fue posible diseñar y modelar la carcasa del módulo y todos los componentes internos. También se diseñó el soporte entre el módulo de adquisición y el equipo de secado. Posteriormente se procedió al ensamblaje físico y ubicación en el equipo.

Con la realización de este trabajo, fue posible mejorar la adquisición de datos del equipo, lo que conllevó a una mejora significativa en la calidad de los datos obtenidos. Este módulo permitió mejorar los procesos de enseñanza y docencia, ya que, con la implementación de la transmisión remota de datos y los laboratorios virtuales, se genera un impacto académico y social, para aquellos estudiantes que no cuentan con la posibilidad de estar presentes en los laboratorios.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar e implementar un módulo de adquisición de datos para el secador convectivo de la Universidad de Antioquia - Seccional Oriente, con la finalidad de mejorar la adquisición de datos del equipo.

B. Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema electrónico que permita realizar la adquisición de datos del proceso de secado usando el ordenador de placa reducida Raspberry Pi.
- Diseñar y realizar el montaje de una interfaz gráfica en el sistema operativo de la placa Raspberry PI, que permita visualizar los datos y las gráficas del proceso.
- Implementar el protocolo VNC u otro, para permitir el acceso remoto a la interfaz gráfica de usuario del equipo.
- Comparar y validar estadísticamente el módulo de adquisición de datos respecto a la metodología tradicional.

III. MARCO TEÓRICO

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia el producto que se extrae de un proceso de secado pasa a empaquetado [1]. Existen diversos tipos de secado, entre los que se encuentra el secado convectivo, en el que el calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor del agua que se elimina al sólido. En el secado convectivo, el aire caliente es impulsado a través de ventiladores y las fuentes de energía más comunes utilizadas para calentar el aire son principalmente resistencias eléctricas, gas natural y el aceite caliente usado a través de intercambiadores de calor [2]. El control del proceso de secado de una partícula depende de:

- La estructura del producto por secar y de los parámetros de secado, tales como la temperatura, la velocidad y la humedad relativa del aire.
- El contenido de agua del producto por secar.
- Las dimensiones del producto por secar.
- La superficie expuesta a la velocidad de transferencia.
- El tiempo de secado.
- El contenido de agua de equilibrio del producto por secar [3].

Estas características y parámetros permiten realizar un análisis cuantitativo del proceso de secado, que incluye: curvas de secado, cálculo de velocidades de secado, humedades, entre otros. Este análisis puede ser manual o automatizado, según las características del equipo, en el primero quien realiza el experimento registra manualmente la entrada y salida de datos, por el contrario, en el segundo, una unidad de control realiza todo el registro y análisis del proceso de forma automática, eliminando los errores que se presentan en el registro manual.

Cuando se desea realizar un proyecto que involucre el control de entrada y salida de datos, es necesario utilizar herramientas como los microcontroladores o las SBCs (Single Board

Computers). Estas dos herramientas permiten automatizar, monitorear y controlar variables, entre muchas otras aplicaciones [4]. En este proyecto se pretende automatizar y monitorear la adquisición de datos de un secador convectivo, por lo que estas dos herramientas son opciones para realizar el proyecto.

El uso de microcontroladores y SBCs, dependerá de la aplicación que se desee realizar, pues debido a sus características propias, los microcontroladores y las SBCs pueden presentar variados y diferentes tipos de implementación. Por ejemplo, un microcontrolador es un tipo especial de computadora cuyo objetivo principal es acceder e interactuar con otro hardware. Tiene solo unos pocos recursos en términos de CPU y RAM, pero también proporciona consumos de energía muy bajos y la disponibilidad de procesamiento detallado en tiempo real del hardware conectado. Es importante destacar que un microcontrolador no tiene un sistema operativo completo y de propósito general, como si lo tienen las SBCs [2].

En cuanto a las SBCs, estas se han desarrollado fundamentalmente orientadas al mercado de los ordenadores personales y las estaciones de trabajo, en estas se requiere una elevada potencia de cálculo, el manejo de gran cantidad de memoria y una gran velocidad de procesamiento. Algunas de las características de las SBCs es que son de bajo costo, de fácil implementación y pueden conectarse fácilmente a otro hardware. Esto permite que las SBCs sean excelentes herramientas de experimentación y enseñanza [2]. Las SBCs proporcionan interfaces orientadas al consumidor estándar actuales como HDMI, USB, Wifi y Bluetooth. Ofrecen tarjetas SD o SSD pequeñas para almacenar datos y tienen varios núcleos de CPU y RAM. Una SBC tiene un sistema operativo completo instalado, normalmente Linux o Windows, y por lo tanto proporciona una gran selección de hardware de uso general. [3].

En este proyecto se desea realizar una interfaz gráfica de usuario, realizar conexiones a hardware y contar con acceso a internet para realizar transmisión remota de datos, por lo que se concluye que una SBC es la mejor opción en comparación con los microcontroladores, que, a pesar de ser económicos y simples, se encuentran un poco limitados para lo que se desea realizar en este proyecto.

Las SBCs u ordenadores de placa única permiten la automatización de la adquisición de datos de un proceso. La automatización de un proceso industrial (máquina, conjunto o equipo industrial) consiste en la incorporación al mismo, de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento, eliminando casi por completo la intervención manual humana [6]. La única interacción que tiene el usuario con el equipo o máquina es a través de una interfaz gráfica de usuario.

La Interfaz Gráfica de Usuario (GUI por su nombre en inglés, Graphical User Interface) es fundamental en el desarrollo de interfaces máquina - usuario; al comenzar a trabajar con una computadora el usuario interactúa con la Interfaz, ya sea la del sistema operativo o la de un software en particular. Las piezas principales de las interfaces de usuario son: un puntero gráfico, iconos que simbolizan acciones como los botones, ventanas y cuadros de dialogo, menús, barras de desplazamiento, entre otros [7]. Existen diferentes herramientas para el diseño de interfaces gráficas de usuario, en este trabajo se utilizará el lenguaje de alto nivel Python para la realización de la interfaz, específicamente se utilizará la librería PyQt5, que esta orientada exclusivamente al diseño de interfaces gráficas. PyQt5 es básicamente un marco que proporciona herramientas para el diseño de una interfaz gráfica de usuario. El marco PyQt es el enlace de Python del marco Qt, que es un repositorio de diseño de GUI muy popular [8].

La unidad de control que se utilizará será la Raspberry Pi. La Raspberry Pi es un computador de placa reducida, computador de placa única o computador de placa simple (SBC) de bajo costo desarrollado por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas. Es un pequeño ordenador, que puede ser utilizado para muchas de las cosas que un computador de escritorio hace, como hojas de cálculo, procesadores de texto y juegos. También reproduce vídeo de alta definición [9]. La configuración de la Raspberry Pi está preparada para trabajar con programación física de componentes electrónicos mediante sus pines GPIO (general-purpose input/output), los cuales pueden ser utilizados para una amplia gama de aplicaciones, que van desde conectar un LED, un sensor o realizar aplicaciones domóticas.

Si se instala y activa VNC en una Raspberry Pi es posible instalar, configurar, visualizar y gestionar el miniordenador desde otro PC. Bajo las siglas VNC (Virtual Network Computing) se distribuye un software cliente-servidor con el que se puede mostrar y controlar el contenido de la pantalla del sistema deseado (servidor) en otro sistema (cliente). Para ello, las entradas de teclado y los movimientos y clics de ratón del lado del cliente se transmiten directamente al ordenador remoto [10].

Los principales parámetros a tener en cuenta en el secador de tipo convectivo son la masa y las temperaturas. La masa se mide utilizando una celda de carga, la cual es un elemento transductor que puede traducir la presión (fuerza) en una señal eléctrica. Uno de los principales tipos de celdas de carga son las galgas extensiométricas, este tipo de celda de carga es un elemento mecánico cuya fuerza se detecta mediante la deformación de una o varias galgas extensiométricas en el elemento. Las celdas de carga están formadas por galgas extensiométricas en configuración de puente Wheatstone [11]. Para conectar una celda de carga son necesarios 4 cables, los colores utilizados habitualmente son Rojo, Negro, Blanco y Verde. Cada color corresponde a una señal como se muestra a continuación:

- Rojo: Voltaje de excitación +, E+, VCC
- Negro: Voltaje de excitación -, E-, GND
- Verde: Amplificador -, Señal -, A-
- Blanco: Amplificador +, Señal +, A+

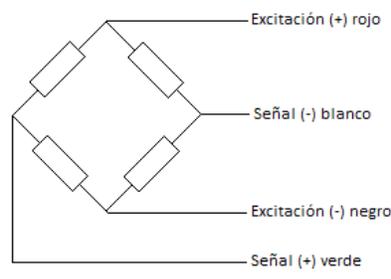


Fig. 1. Configuración celdas de carga.

Para convertir la presión que se genera en la celda de carga, es necesario utilizar un módulo conversor, en este caso, el módulo conversor Analógico/Digital de 24 Bits HX711 / CAD / ADC. Se trata de un amplificador y convertidor analógico digital con una precisión de 24 bits diseñado para aplicaciones a pequeña escala y de control industrial. El módulo HX711 posee internamente la electrónica de acondicionamiento y conversión A/D, permitiendo la lectura del puente Wheatstone formado por la celda de carga y también un conversor ADC de 24 bits. Este módulo se comunica por medio de una interfaz serial de 2 pines (Clock y Data) similar al I2C [11].

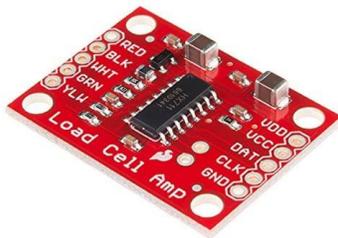


Fig. 2. Amplificador de celda de carga HX711. (Fuente: <https://n9.cl/4ulp4>)

Para el parámetro de temperatura se utilizan las termocuplas, que son sensores que permiten medir la temperatura de un proceso. Una termocupla está fabricada con la unión física de dos conductores y genera un voltaje proporcional a la temperatura medida. Las termocuplas tipo K son aleaciones de cromo/alumel, sigue siendo el termopar más utilizado para aplicaciones industriales debido a su rango (-150 a 1100°C) y precio [12].



Fig. 3. Termocupla tipo K. (Fuente: <https://n9.cl/ibc2m>)

Así como para la masa, en la temperatura también es necesario el uso de un módulo que convierta el voltaje producido en la termocupla a una temperatura proporcional. El MAX6675 es

un convertidor analógico a digital especializado para termocuplas tipo K. Con este módulo es posible conectar fácilmente una termocupla a cualquier microcontrolador a través de una interfaz SPI unidireccional. La resolución es de 0.25° y el rango de uso de la tarjeta es de 3.0V a 5.5V [13]. El módulo MAX6675 y su configuración se presenta en la figura 4.

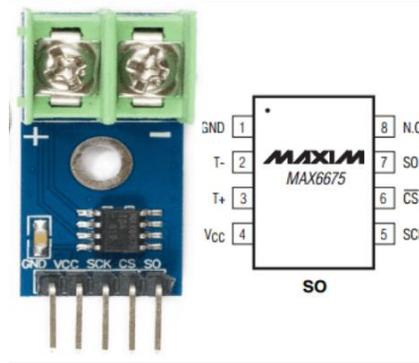


Fig. 4. Configuración MAX6675 (Fuente: <https://n9.cl/zu5ob>)

IV. METODOLOGÍA

En la figura 5 se presentan las etapas en las que se dividió la metodología de este trabajo. El cuadro punteado es un objetivo adicional que se logró realizar en el desarrollo del proyecto.



Fig. 5. Metodología

A. *Desarrollo sistema electrónico de adquisición de datos*

1. *Desarrollo de los sistemas electrónicos de sensado de temperatura y masa.*

Sensado de temperatura: el sensado de temperatura se realizó mediante el uso del módulo MAX6675 y termocuplas tipo K. Se utilizaron 3 termocuplas tipo K, las cuales monitorean constantemente las temperaturas en los ductos del secador y en la cabina de secado. Cada módulo MAX6675 fue conectado a los pines GPIO de la Raspberry Pi.

Sensado de masa: el sensado de masa se realizó mediante el uso del módulo HX711 y una celda de carga modelo CZL601 con una carga nominal de 10 kg.

2. *Diseño y montaje de la tarjeta electrónica.*

El diseño y montaje de la tarjeta electrónica, se realizó en una tarjeta de tipo universal, donde fueron soldados y conectados los módulos MAX6675 y HX711, para la conexión con las termocuplas y la celda de carga respectivamente. A la tarjeta también fueron soldados pines tipo header para la conexión con la tarjeta Raspberry Pi y el display. Se procedió también a evaluar continuidad en la tarjeta y posteriormente a evaluar que los sistemas de sensado y temperatura estuvieran funcionando correctamente.

3. *Pruebas y ajustes.*

Para utilizar la celda de carga es necesario realizar la calibración y el ajuste. La calibración de la celda de carga se realiza con base a un sistema patrón, que indica la relación de desviaciones micrométricas-carga aplicada. La calibración se realiza utilizando una masa patrón, que permita relacionar la salida del módulo amplificador HX711 con la presión ejercida sobre la celda de carga.

B. Diseño interfaz gráfica de visualización

1. Identificación de los parámetros que deben ser presentados en la interfaz gráfica.

Se identificaron los parámetros necesarios que debía contener la interfaz gráfica, los cuales son: temperaturas en los ductos de ventilación, temperatura en la cabina de secado, masa y tiempo de operación. La interfaz debe incluir mandos para el inicio, el stop y el reseteo de la aplicación, así como componentes para efectuar tareas como guardar datos y gráficas, y calibrar la celda.

TABLA I
MANDOS DE LA INTERFAZ GRÁFICA

Mando	Función
Inicio	Inicia la aplicación, se empiezan a medir temperaturas y masa, se empieza a graficar masa vs tiempo de operación
Stop	Se termina la ejecución del programa, se deja de graficar, se para el tiempo de operación
Reseteo	Se resetea la aplicación por completo, el tiempo de operación vuelve a 0 y la gráfica de masa vs tiempo de operación es borrada
Guardar datos	Como su nombre lo indica, guardar los datos del experimento (masa y tiempo) en un archivo .csv
Guardar gráfica	Como su nombre lo indica, guarda la gráfica del experimento (curva de secado, velocidad de secado o % humedad) en un archivo .png
Calibrar celda	Este mando coloca en cero la medición de masa.

2. Realización del montaje de la interfaz gráfica en el sistema operativo de la Raspberry PI.

El desarrollo de la interfaz gráfica de usuario se realizó en el lenguaje de programación Python, utilizando la librería PyQt5. El código para realizar la interfaz se dividió en tres pestañas: sección principal, sección gráficas velocidad de secado y sección gráficas % de humedad. En la figura 6 se observa el contenido de cada sección y los mandos que utilizan.

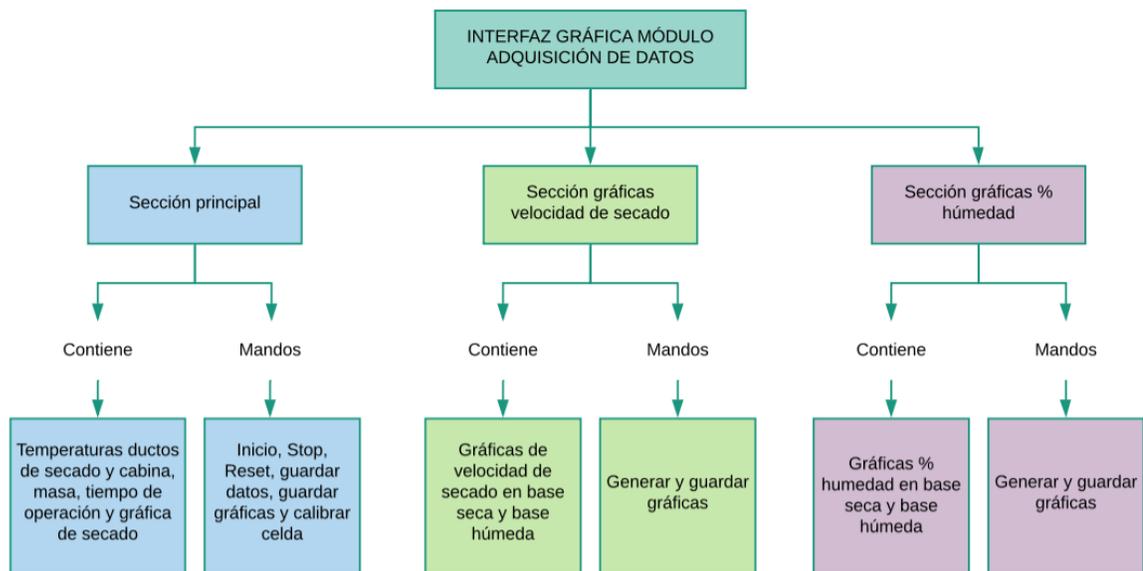


Fig. 6. Secciones de la interfaz gráfica del módulo de adquisición de datos.

C. Diseño y ensamble del módulo de adquisición de datos

Se procede a realizar de la carcasa del módulo de adquisición de datos. Para esto se utilizó el software de diseño y modelado SpaceClaim. Este diseño conllevó principalmente:

- Diseño de la carcasa donde van incorporados: la tarjeta electrónica con los módulos de sensado de temperatura y masa, la tarjeta Raspberry Pi, pantalla, y algunos accesorios como: adaptadores de chasis para las termocuplas y la celda de carga, interruptor y adaptador a corriente. La base del módulo fue cortada, pulida y doblada en acero inoxidable de 1 mm de espesor, con la finalidad de darle firmeza al diseño. La tapa del módulo fue cortada y doblada, utilizando acrílico de 5 mm.
- Diseño del soporte que permite asegurar el módulo de adquisición de datos al equipo de secado. El soporte del módulo fue diseñado para ser cortado y doblado en el material acrílico de 10 mm de espesor.

D. Implementación protocolo VNC y transmisión remota de datos

Se instala VNC Server en el sistema operativo de la Raspberry Pi, y se crea un usuario general para el secador que permita ingresar remotamente desde equipos que posean el programa VNC Viewer. Este sistema solo permite la conexión de 5 equipos al tiempo, por lo que para la transmisión remota de datos se presenta también como opción utilizar el navegador web de la Raspberry Pi, que permite realizar conexiones a plataformas de reuniones online como lo es Google Meet y Zoom.

E. Comparación y validación estadística del módulo de adquisición de datos respecto a la metodología tradicional

- Se realizan 2 pruebas por método (módulo de adquisición y metodología tradicional), a una temperatura diferente por prueba: 50 y 40°C respectivamente.
- Se construyen las curvas de secado para cada prueba.
- Se procede a calcular el criterio estadístico coeficiente de determinación R^2 , con la finalidad de validar los valores obtenidos con el módulo de adquisición respecto a los datos obtenidos por metodología tradicional (manual).

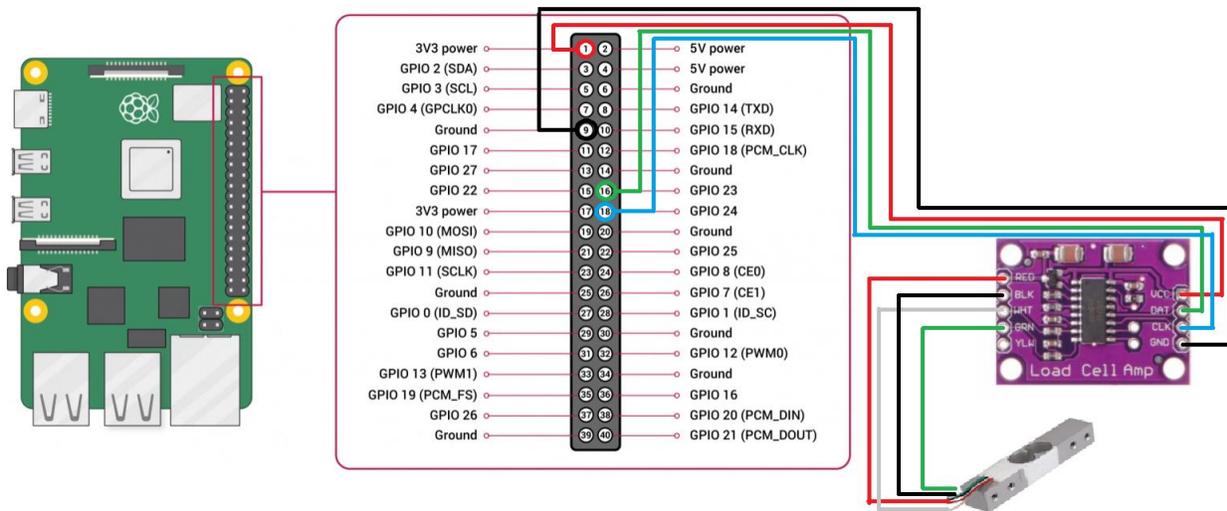


Fig. 8. Conexiones Raspberry Pi – HX711

La calibración de la celda de carga se realizó con una masa patrón (masa conocida), que permite encontrar la razón de cambio de la celda de carga, respecto a la presión ejercida. En la figura 9 se presentan los pasos para realizar la calibración de la celda de carga.

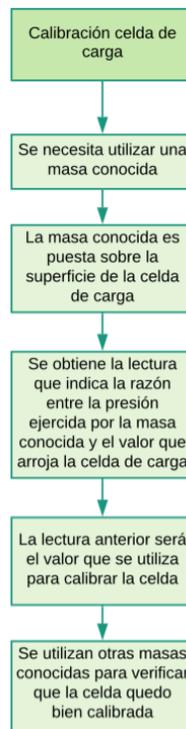


Fig. 9. Procedimiento para calibrar celda de carga

B. Diseño y montaje de la tarjeta electrónica

Se soldaron los componentes electrónicos a la tarjeta universal. Se reviso la continuidad de las conexiones para evitar cortocircuitos o uniones de soldadura abierta. Con la tarjeta soldada se probó el funcionamiento de los sistemas de sensado de temperatura y masa. En la figura 10 se observa el circuito y en la figura 11 y 12 el modelo 3D y la tarjeta ensamblada.

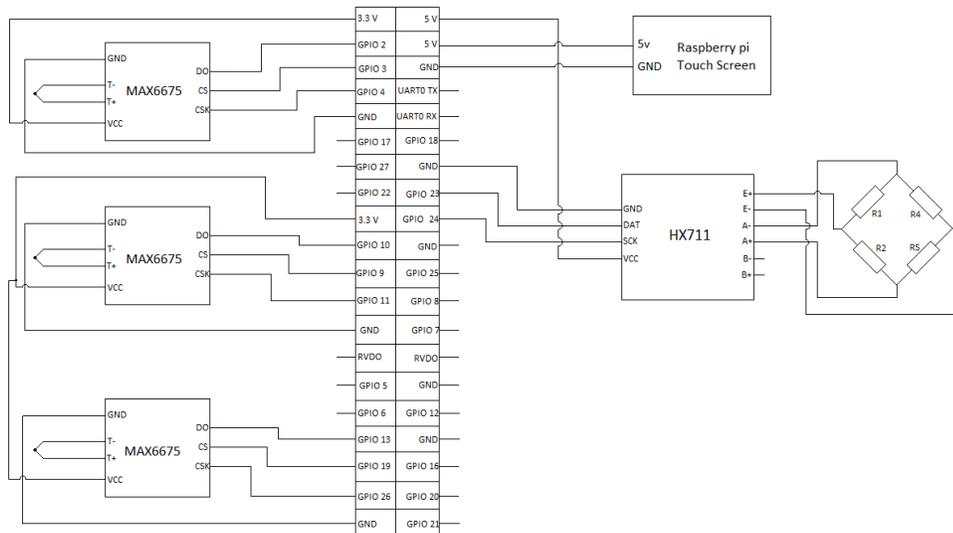


Fig. 10. Diseño circuito tarjeta universal.

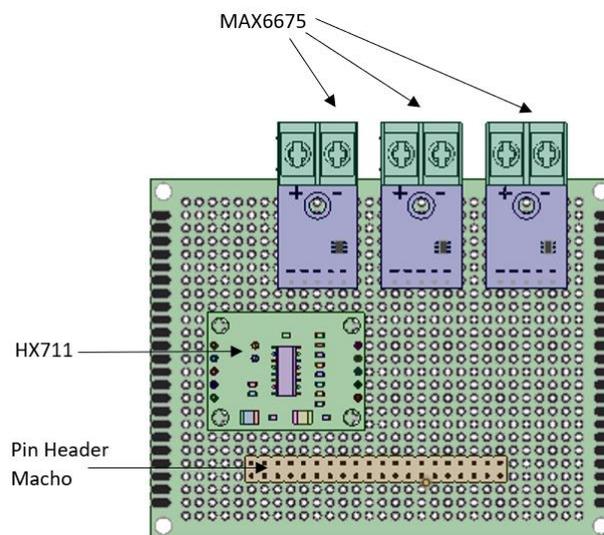


Fig. 11. Diseño tarjeta universal en SpaceClaim

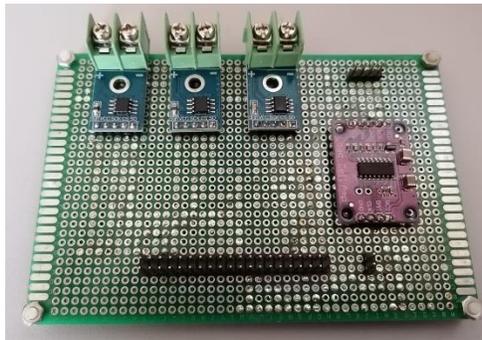


Fig. 12. Tarjeta universal ensamblada

C. *Diseño interfaz gráfica de visualización*

El diseño de la interfaz gráfica de visualización fue dividido en tres secciones: principal, gráficas velocidad de secado, gráficas % humedad.

Pestaña principal: En la figura 13 se observa el bosquejo general utilizado para el diseño de la sección principal de la interfaz gráfica.

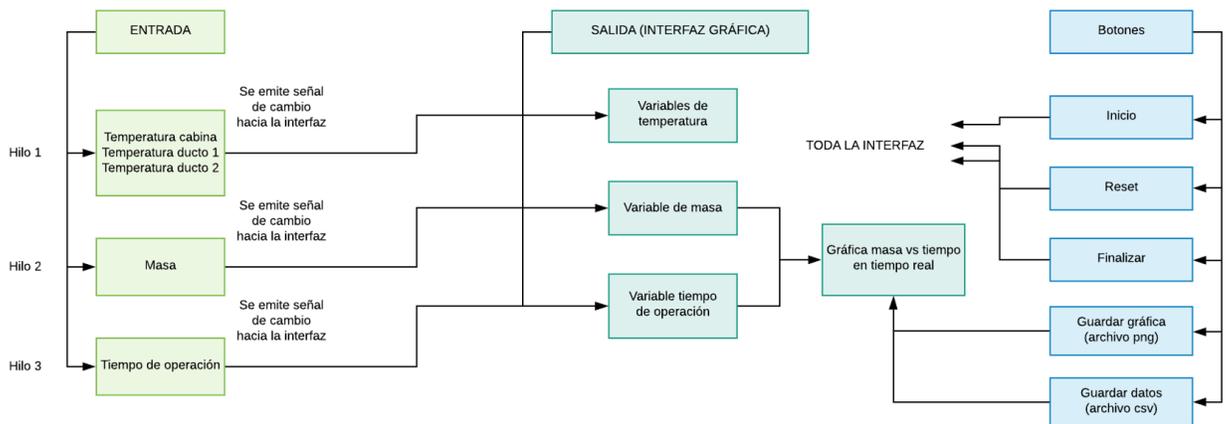


Fig. 13. Diseño sección principal interfaz



Fig. 14. Sección principal de la interfaz gráfica

La figura 14, presenta la pestaña principal de la interfaz, que incluye los principales parámetros de la operación, la curva de secado en tiempo real y los botones para la interacción con los usuarios.

Pestaña gráficas velocidad de secado: En la figura 15 se observa el bosquejo general utilizado para el diseño de la sección de velocidades de secado de la interfaz gráfica.

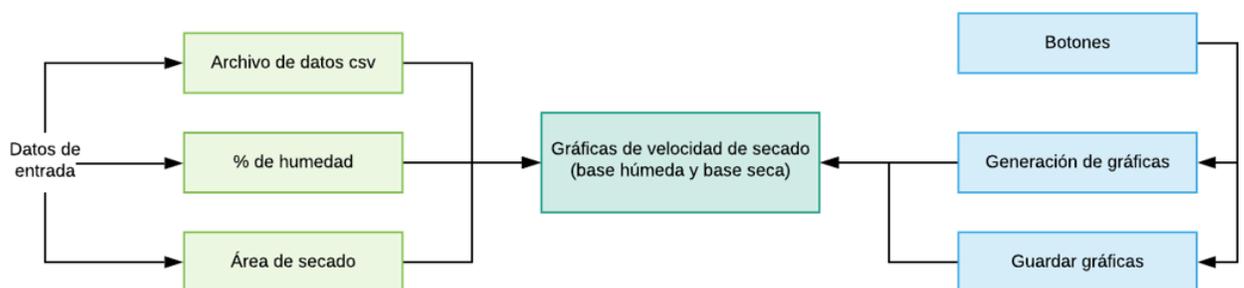


Fig. 15. Diseño sección gráficas velocidad de secado

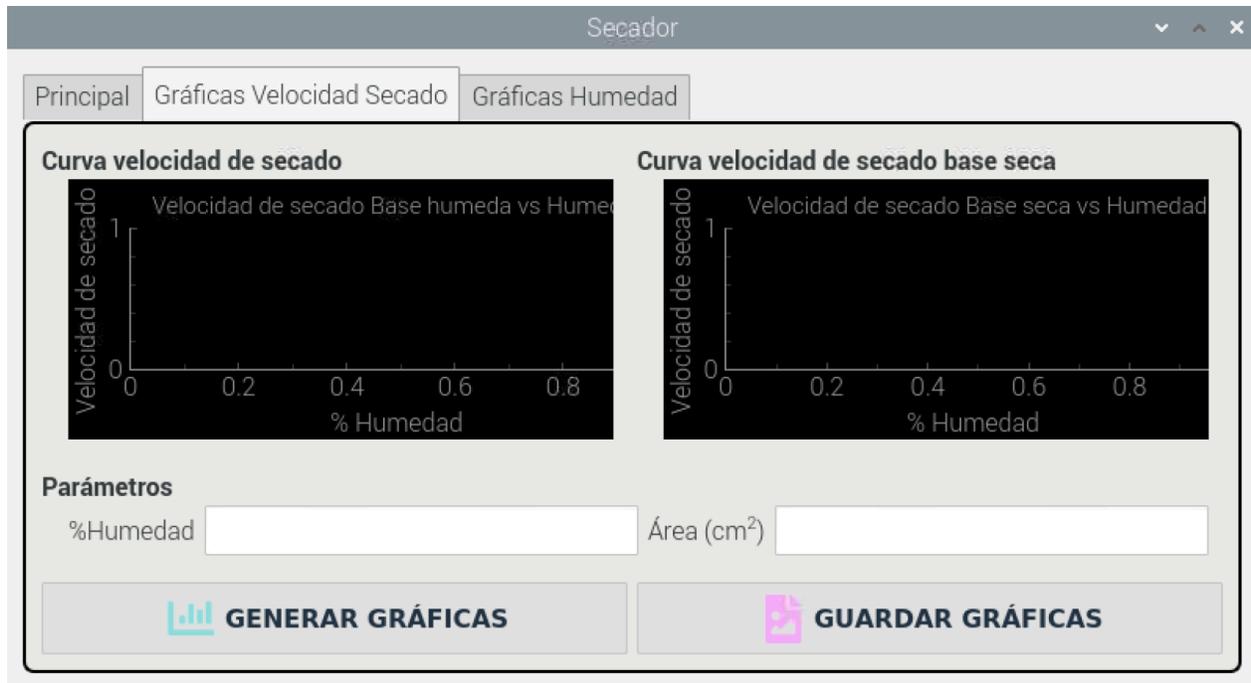


Fig. 16. Sección gráficas velocidad de secado

La figura 16, presenta la pestaña correspondiente a las curvas de velocidad de secado, que incluye como su nombre lo indica las curvas de velocidad de secado en base húmeda y base seca, además de botones para interacción con el usuario.

Pestaña gráficas % humedad: En la figura 17 se observa el bosquejo general utilizado para el diseño de la sección de % de humedad de la interfaz gráfica.

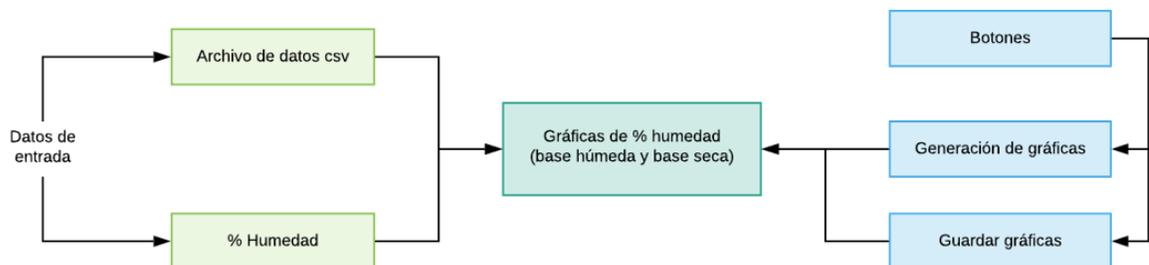


Fig. 17. Diseño sección gráficas % humedad

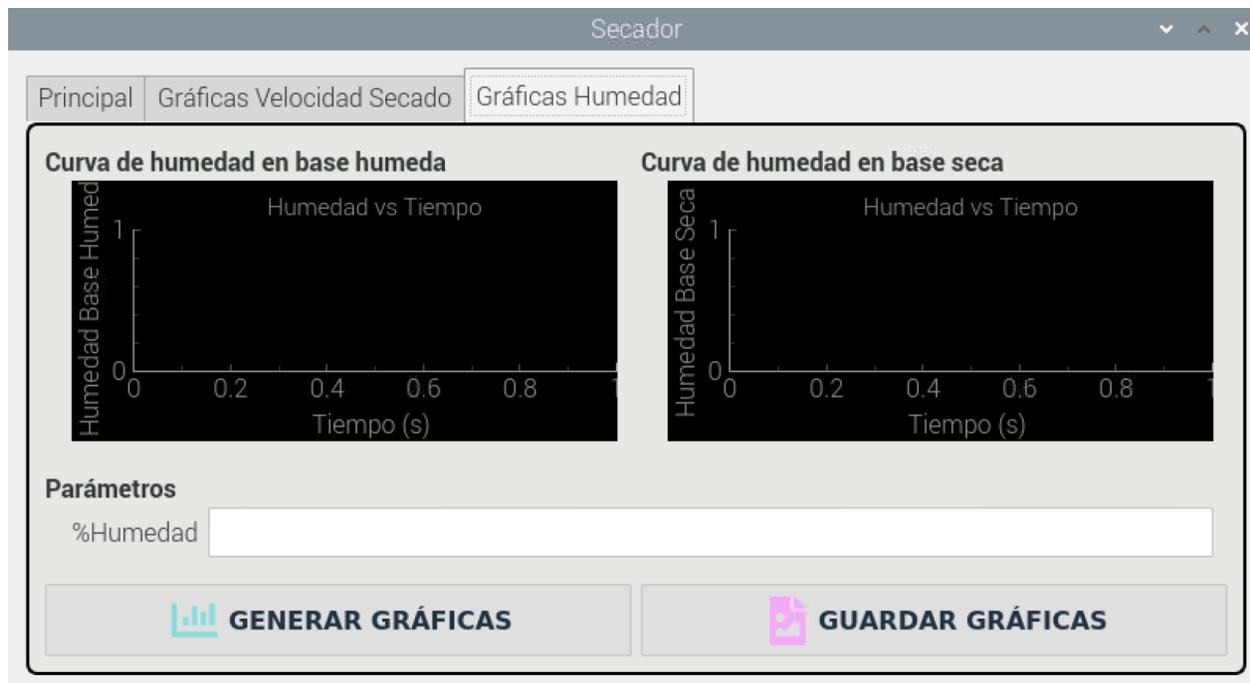


Fig. 18. Sección gráficas % humedad

La figura 18, presenta la pestaña correspondiente a las curvas de % de humedad, que incluye como su nombre lo indica las curvas de humedad en base húmeda y base seca, además de botones para interacción con el usuario.

D. Implementación protocolo VNC y transmisión remota de datos

En las siguientes figuras se observa cómo es posible acceder remotamente a la interfaz gráfica del módulo de adquisición de datos, la figura 19 utilizando el protocolo VNC, el cual permite visualizar y “manejar” la interfaz remotamente; en la figura 20 se observa cómo es posible conectarse a la herramienta Google Meet, para transmitir únicamente la pantalla del módulo de adquisición de datos. La diferencia entre estas dos metodologías es que con el protocolo VNC solo es posible la conexión de 5 equipos al tiempo a la interfaz, mientras que con herramientas como Google Meet es posible la conexión de hasta 100 personas.

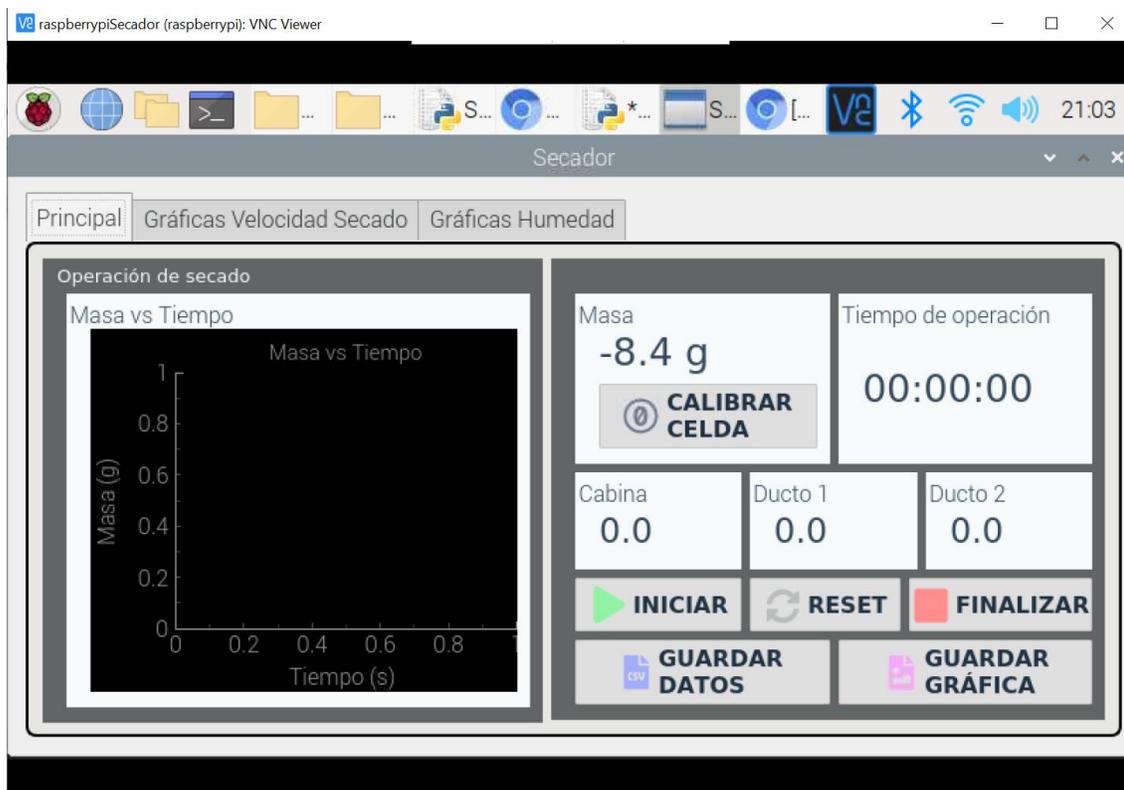


Fig. 19. Interfaz a través de protocolo VNC

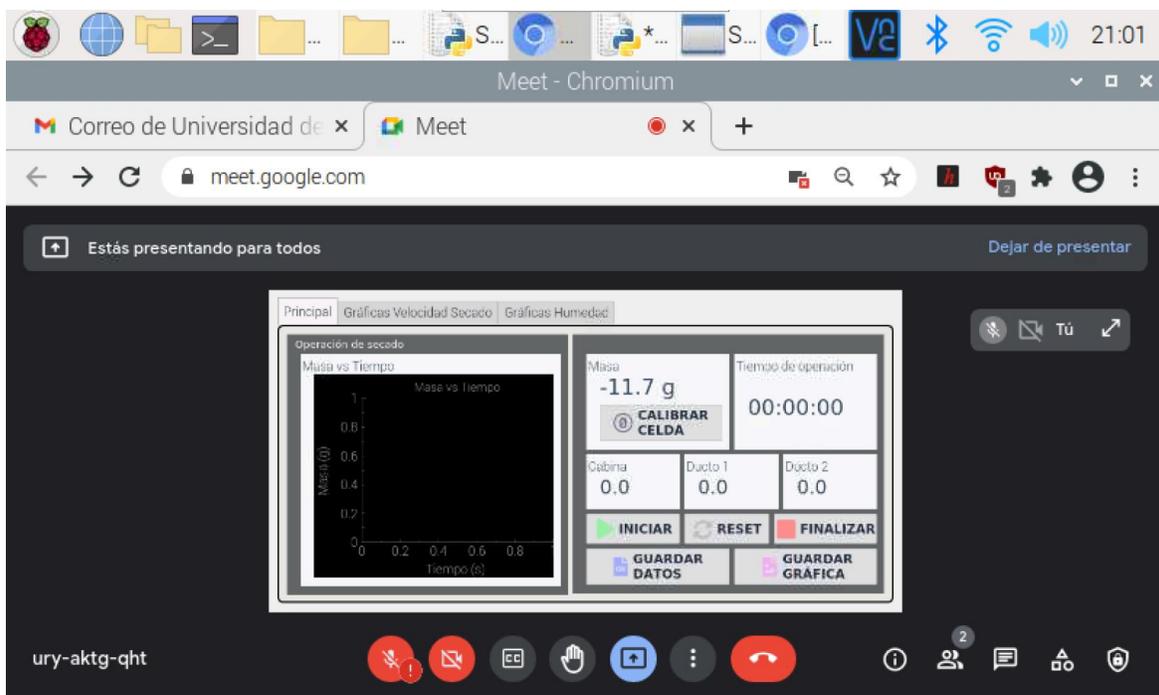


Fig. 20. Interfaz a través de Google Meet

E. Diseño y ensamble del módulo de adquisición de datos

En las figuras 21, 22, 23, 24 y 25 se observan los diseños realizados en el programa de diseño y modelado SpaceClaim, a su vez se muestran las piezas después del corte, pulido, y doblado para el módulo.

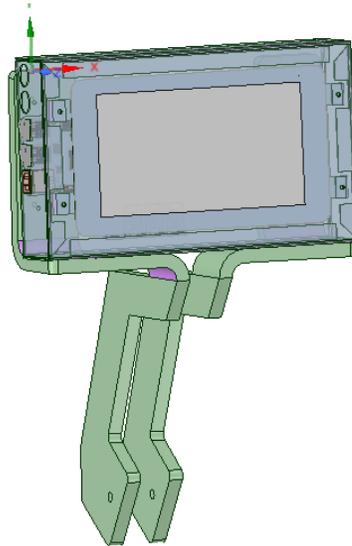


Fig. 21. Diseño de la caja del módulo

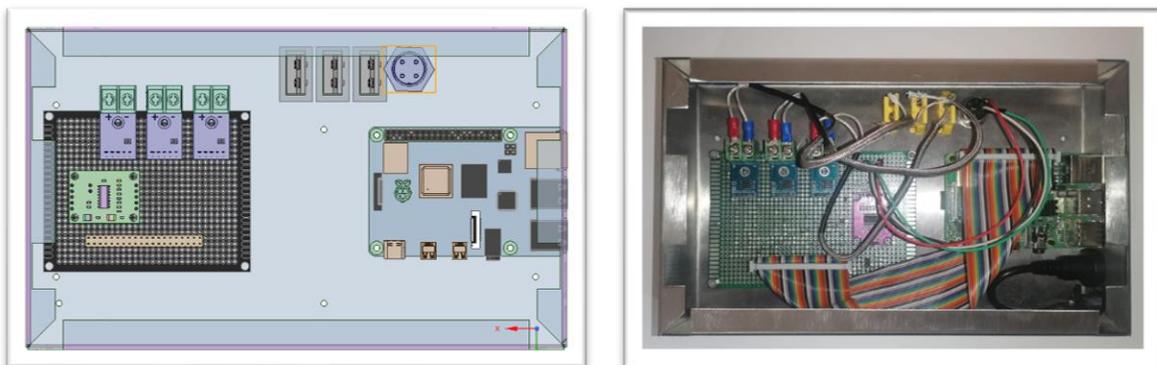


Fig. 22. Diseño y ensamble de la caja del módulo con componentes

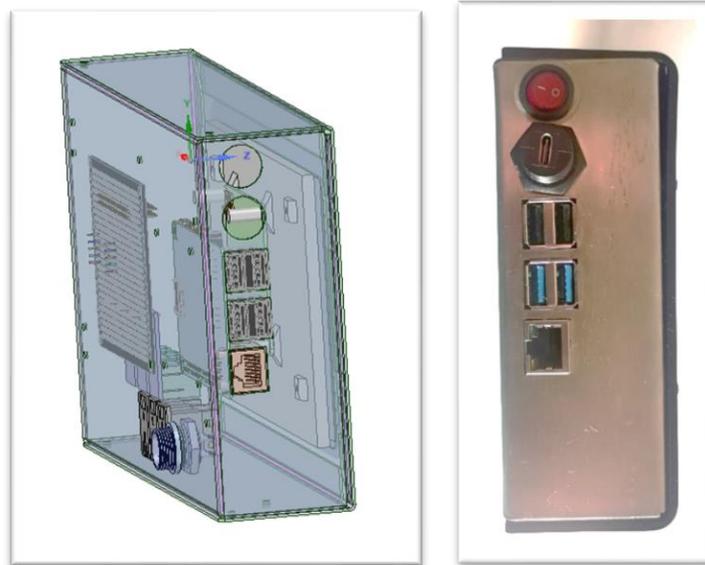


Fig. 23. Diseño y ensamble de la caja del módulo lateral

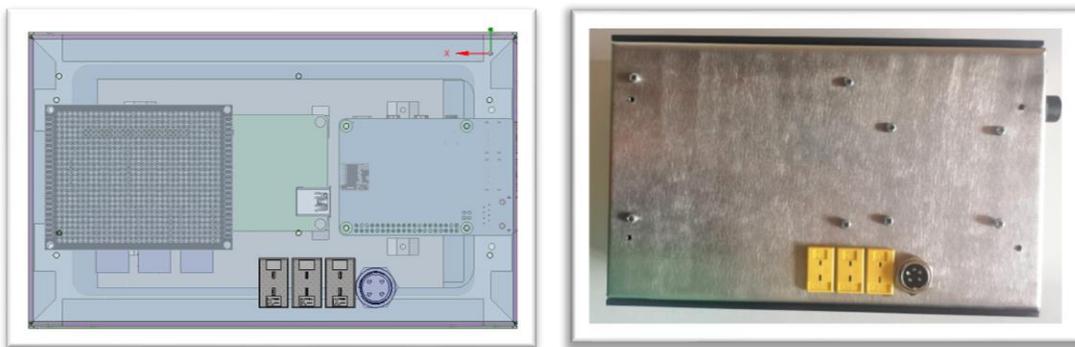


Fig. 24. Diseño y montaje de la caja del módulo parte posterior

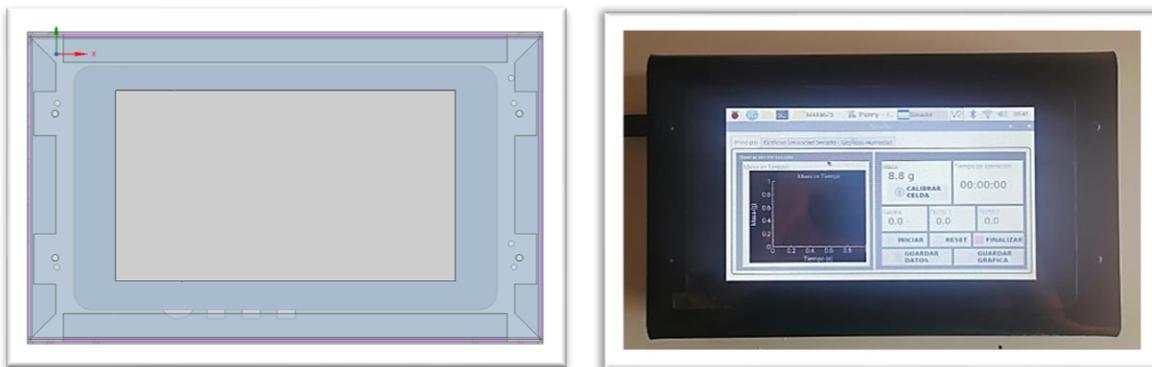


Fig. 25. Diseño y ensamble de la caja del módulo parte frontal

Los diseños y piezas del soporte que se obtuvieron se observan en la figura 26.

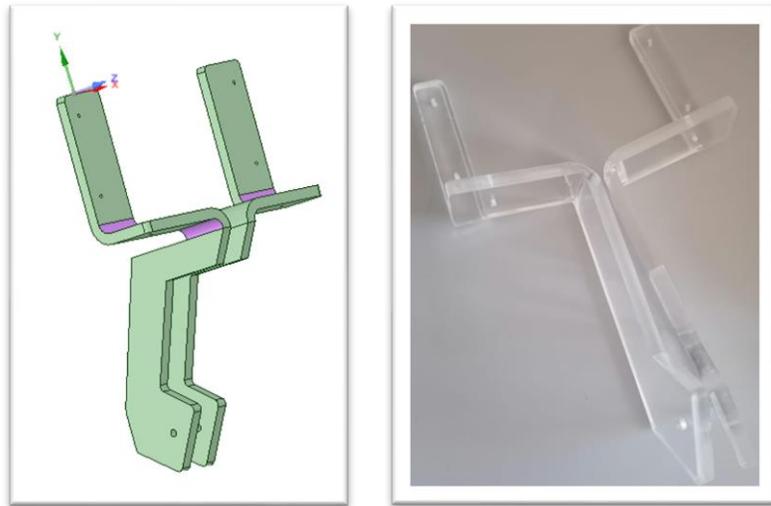


Fig. 26. Soporte del módulo de adquisición

En la figura 27 se observa el módulo de adquisición de datos y su soporte puestos y ubicados en el equipo de secado de la Universidad de Antioquia – Seccional Oriente.



Fig. 27. Módulo de adquisición de datos ubicado en el equipo de secado

F. Comparación y validación estadística del módulo de adquisición de datos respecto a la metodología tradicional

Para realizar las pruebas de validación se utilizaron rodajas de manzanas como material de secado, con las siguientes condiciones para cada experimento.

TABLA II
CONDICIONES DE LOS EXPERIMENTOS DE SECADO

Temperatura	Velocidad del aire	Masa	Tiempo de secado
40°C	1.49 m/s	166 g	2 h y 15 min
50°C	1.49 m/s	148 g	2 h y 15 min

El criterio estadísticos utilizado para validar el ajuste entre los valores obtenidos con el módulo de adquisición automático respecto de los datos obtenidos por metodología manual fue el coeficiente de determinación, R² (ec. 1)

$$R^2 = \frac{scE}{scG} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

En la figura 28 se observa las curvas de secado experimentales analíticas y automatizadas para cilindros de manzana a dos temperaturas.

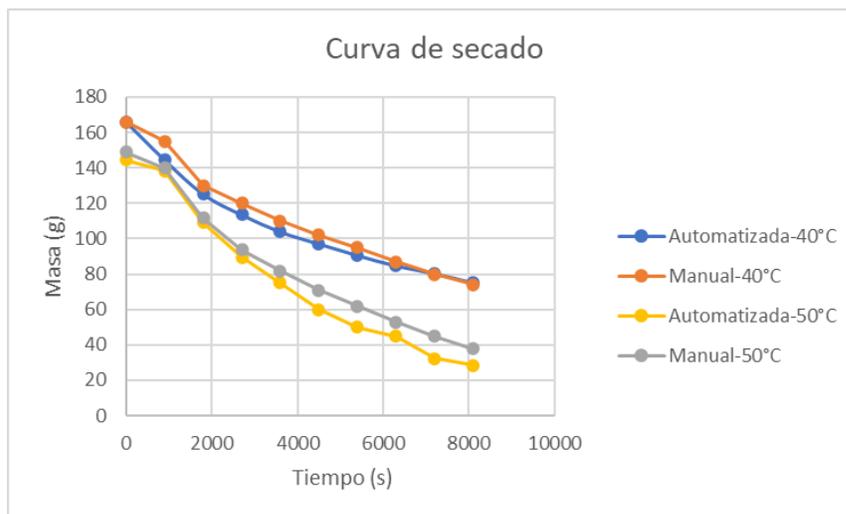


Fig. 28. Curvas de secado experimentales analíticas y automatizadas.

En la figura 28, se observan las curvas de secado obtenidas en los experimentos con toma de datos manual y automatizadas, se observa que se presentan ciertas diferencias en algunos de los puntos, esto puede ser reflejo de diferencias en las corridas experimentales, como: tamaño de las muestras, posición de las muestras, entre otras condiciones, que limitan recrear exactamente una corrida con otra.

La gráfica no es un criterio definitivo para validar el experimento, por lo que se procede realizar pruebas estadísticas más certeras, como el coeficiente de determinación (R^2). En la tabla III se observan los resultados de las prueba estadísticas de validación R^2 .

TABLA III
RESULTADOS PRUEBAS DE VALIDACIÓN ESTADISTICA

Temperatura	R^2
40°C	0,97
50°C	0,93

De los resultados estadísticos obtenidos en la TABLA III, se puede observar que los coeficientes de determinación (R^2) para ambas temperaturas son superiores a 0,9 lo que se interpreta para efectos de validación que las variables obtenidas de manera manual y automatizada presentan un alto grado de explicación y relación entre sí.

VI. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir que el módulo de adquisición de datos es una alternativa viable para la toma y análisis de los datos que se obtienen en el proceso de secado convectivo. El módulo de adquisición que se obtuvo mejora significativamente los análisis, ya que permite obtener las gráficas de secado, velocidad de secado y % de humedad, además permite guardar los datos en archivos .csv, que pueden ser utilizados para más análisis.

El módulo de adquisición facilita la ejecución de los experimentos de secado, ya que se automatiza la adquisición de los datos, evitando pérdidas significativas que se presentaba en la adquisición manual, gracias a que se elimina el tedio que conllevaba el registro y la toma de estos, debido a la larga duración del experimento. En conclusión, la automatización de la adquisición de los datos da como resultado un proceso mucho más flexible y con menos error asociado.

Es importante resaltar y concluir también que con este módulo de adquisición se mejoran los procesos de docencia-enseñanza-aprendizaje, ya que el acceso remoto a la interfaz permite que los estudiantes puedan observar y obtener desde cualquier lugar con acceso a internet los datos que está arrojando el experimento, facilitando el acceso a la educación e información sin barreras.

REFERENCIAS

- [1] W. McCabe, J. Smith, and P. Harriot, “Operaciones unitarias en ingeniería química” McGraw-Hill, 1981, pp. 821.
- [2] P. Fito Maupoey, A. Andrés Grau, J. Barat Baviera and A. Albors Sorolla, “Introducción al secado de alimentos por aire caliente”, Universitat Politècnica De València, 2001, pp. 12.
- [3] V. Velasquez, “Estandarización del Proceso de Secado de Carragenina en la Empresa Extractos Naturales Gelymar S.A. Chile”, Universidad Austral de Chile, 2007, pp. 5.
- [4] C. N. Pérez Catalán, C. Márquez Sánchez, R. Silva Ortigoza, J. Sandoval Gutierrez, J. R. García Sánchez and M. Antonio Cruz, “Una introducción a las single board computers”, [En línea], 2018. Disponible en: <https://n9.cl/hsn6c>
- [5] M. Parks, “Picking The Right Tool For The Job: MCU, SBC or FPGA?”, [En línea], 2017. Disponible en: <https://n9.cl/3u0jc>
- [6] E. García Moreno, “Automatización de procesos industriales”, Universitat Politècnica De València, 1999, pp. 1.
- [7] C. Albornoz, M. Berón and G. Montejado, “Interfaz Gráfica de Usuario: el Usuario como Protagonista del Diseño”, Universidad Nacional de San Luis, 2017, pp. 570.
- [8] D. Sarmentero, “Introducción a PyQt”, [En línea], 2013. Disponible en: <https://2013.es.pycon.org/media/pyqt.pdf>
- [9] C. Sánchez, “Raspberry Pi y arduino”, ACIS, 2017
- [10] Digital Guide IONOS. Protocolo VNC.
- [11] Sparkfun, “Getting Started with Load Cells”, Disponible en: <https://n9.cl/1rqsl>
- [12] Arian. Control e Instrumentación. “Que son y como funcionan las termocuplas”.
- [13] Y. Grajales Erazo and J. F. Monsalve Vargas, “Diseño de un instrumento de adquisición de temperatura a través de termocupla tipo k y microcontrolador usando el protocolo de comunicación spi”, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, 2019, pp. 29.

ANEXOS

A. *Código y diseño módulo*

El código del módulo de adquisición de datos y el diseño del módulo se encuentran en el repositorio: <https://github.com/EstefaniaCardonaC/Modulo-Adquisicion-Datos-Secador>