

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL
DESHIDRATADOR DE BANDEJA S-001 DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA
QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**AGUEDA DEL PILAR ROZO CONDE
JULIO CESAR TELLEZ RUIZ**

.

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA MECATRONICA**



PAMPLONA, 2019

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL DESHIDRATADOR DE BANDEJA S-001 DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA ii

**AGUEDA DEL PILAR ROZO CONDE
JULIO CESAR TELLEZ RUIZ**

**Trabajo de grado para obtener el título de
Ingeniera Química e Ingeniero Mecatrónico**

DIRECTOR:

MSc. Diego Armando Mejía Bugallo

CODIRECTOR:

MSc. Álvaro Eulalio Villamizar Villamizar

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA MECATRONICA**



PAMPLONA, 2019

DEDICATORIA

iii

La vida se encuentra plagada de retos, y uno de ellos es la UNIVERSIDAD. Tras verme dentro de ella, me he dado cuenta que más allá de ser un reto, es una base no solo para mi entendimiento, sino para lo que concierne a la vida y a mi futuro.

Le agradezco primero que todo a DIOS ya que me permitió culminar ésta etapa de mi vida, a mis padres: BLANCA y EDUARDO, a mis hermanos: POLO y CARMENZA, mis sobrinos: PIPE y EDWARD, a mi abuela: ELCIDA, por su amor incondicional, y por su apoyo en todos los momentos de mi vida buenos y malos nunca me dejaron decaer.

Adicionalmente agradezco a Cristhian por su compañía y apoyo en mi vida.

PILAR ROZO

El amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban mis padres por mi avance y desarrollo de mis estudios, es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo.

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre Flor Elba Ruiz por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, agotadoras noches en las que su compañía y la llegada de sus cafés era para mí como agua en el desierto; gracias a mi padre Julio Téllez por siempre desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias a los maestros de escuela Hugo Pérez y Marta Doris, quienes fueron mis segundos padres por cada consejo y por cada una de sus enseñanzas que fueron las mejores bases que pude recibir para enfrentar cada momento y dificultades durante mi vida.

JULIO TELLEZ

AGRADECIMIENTOS

Al creador de todas las cosas, el que nos ha dado fortaleza para continuar, cuando a punto de caer hemos estado.

A los ingenieros Álvaro Villamizar y Diego Mejía Bugallo por su orientación y dedicación profesional para llevar a cabo este proyecto.

A la Universidad de Pamplona y a todo el cuerpo de docentes que fueron parte de mi formación como profesional.

A mis familiares y amigos que estuvieron presentes en los diferentes momentos de esta etapa de mi vida.

Finalmente le agradezco a Cristhian por ser un pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional en todo los momentos.

PILAR ROZO

Agradezco a mi pareja Tatiana Pereira, siendo una gran motivación en mi vida encaminada al éxito, fue el ingrediente perfecto para poder lograr alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida, el poder haber culminado esta tesis con éxito, y poder disfrutar del privilegio de ser agradecido, ser grato con esa persona que se preocupó por mí en cada momento y que siempre quiso lo mejor para mi porvenir.

A mis amigos quienes aportaron enormemente durante este proceso tan importante en mi vida, Darwin Cruz, Oswal Albeiro Vera, Albeiro Bautista, Yerson Blanco Blanco, Daniel Catolico, Francisco Bermeo, Carlos Torres, Magdiel Jaimes, Hugo Urrego, Andres Betancur, Cristian Acero y Bladimir Hernandez.

Adicionalmente a los docentes Armando Mejía Bugallo, Abelardo Mejía Bugallo por su asesoría, disponibilidad y aportación dentro de mi tesis y mi carrera profesional.

Finalmente a la Universidad de Pamplona como institución superior, en la cual me forme como profesional y como persona, todos estas grandes contribuciones que se verán reflejadas en mi futuro.

JULIO TELLEZ

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	4
2.1 OBJETIVOS	5
2.1.1 Objetivo General	5
2.1.2 Objetivos Específicos	5
3. MARTO TEORICO	6
3.1 LA PSICOMETRÍA EN EL PROCESO DE SECADO	8
3.2 MÉTODO ELECTRE	11
3.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA	12
3.3.1 Controladores de acción proporcional, integral y derivativa (PID)	12
3.4 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRÓNICA	13
3.4.1 Electricidad	13
3.4.2 Voltaje	14
3.4.3 Intensidad de corriente	15
3.4.4 Corriente continua	15
3.4.5 Corriente alterna	16
3.4.6 Resistencia eléctrica	16
3.4.7 Potencia	17
3.4.8 Señales análogas digitales	19
3.4.9 Divisor de tención	19
3.4.10 Resistencias de pull-down	19
3.4.11 Sistema electrónico	20
3.4.12 Microcontrolador	21
3.5 ARDUINO	21
3.5.1 ¿QUE ES UN ARDUINO?	22
3.5.2 Lenguaje de programación libre	23
3.5.3 Origen de Arduino	24
3.5.4 Software libre	25
3.5.5 Hardwar libre	25
3.6 PROTOCOLO COMUNICACIÓN	26
3.6.1 I2C	27
3.6.2 SPI	28
3.7 ESTADO DEL ARTE	30
4. METODOLOGIA	33
4.1 GENERALIDADES	33
4.1.1 PRETRATAMIENTOS	33
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA FRUTA	36
4.3 BALANCE DE MASA Y ENERGIA	39
4.3.1 Balance de masa	39

4.3.2 Balance de energía.....	41
4.4 CALCULOS HIDRAULICOS.	42
5 CONTROL DEL DESHIDRATADOR	44
5.1 MÉTODO ZIEGLER-NICHOLS	44
5.1.1 Primer método.....	45
5.1.2 Segundo método.....	46
5.2 COMPONTES	47
5.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA EXPERIMENTAL.....	60
6. COSTO DEL CONTROL EMPLEADO AL DESHIDRATADOR.....	73
7. ANALISIS DE RESULTADOS.	74
7.1 ALTERNATIVAS DE CONTROL	74
7.1.1 Alternativa 1.....	74
7.1.2 Alternativa 2.....	74
7.1.3 Alternativa 3.....	75
7.2 ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA CON EL METODO ELECTRE.....	75
7.3 BALANCE DE MASA	77
7.4 BALANCE DE ENERGIA.....	81
7.5 CALULOS HIDRAULICOS	82
7.6 CURVAS DE SECADO.....	82
7.7 MODELADO MATEMATICO.....	91
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
Lista de referencias	105
Anexos.....	109
Anexos 1: Comportamiento del equipo a 60 °C.....	109
Anexos 2: Comportamiento del equipo a 65°C	117
Anexos 3: Tabla de datos arrojados por el deshidratador en la prueba con durazno sin pretratamiento	127
Anexos 4: Tabla de datos arrojados por el deshidratador en la prueba con durazno con pretratamiento	129
Anexos 5: Tabla de datos arrojados por el deshidratador en la prueba con fresa.....	130
Anexos 6: Manual de Operación y Mantenimiento	133
Anexos 7: Programacion del deshidratador.....	182
Anexos 8: Evidencias	192

Lista de tablas

Tabla 1: Pretratamientos	34
Tabla 2: Composición nutricional del durazno	37
Tabla 3: Composición nutricional de la fresa	38
Tabla 4: Valores sintonización método uno	46
Tabla 5: Valores sintonización método dos	47
Tabla 6: Función de transferencia método uno	68
Tabla 7: Constantes de los diferentes métodos	69
Tabla 8: Costos del control	73
Tabla 9: Ponderación de vector peso	76
Tabla 10: Análisis de importancia	77
Tabla 11: Matriz de concordancia	77
Tabla 12: Matriz de discordancia	77
Tabla 13: Priorización de alternativas según dominancia entre columnas y filas	78
Tabla 14: Propiedades del aire a la entrada	79
Tabla 15: Propiedades del aire a la salida	80
Tabla 16: Condiciones del aire a la entrada y salida	81
Tabla 17: Valores sintonización método uno en la F.T.	97
Tabla 18: Valores de las constantes	99

Lista de figuras

viii

Figura 1: Diagrama psicométrico	11
Figura 2: Comunicación I2C	28
Figura 3: Comunicación SPI	29
Figura 4: Diagrama de bloques con recirculación	39
Figura 5: Control PID de una planta	45
Figura 6: Curva experimental en forma “S”	45
Figura 7: Oscilación sostenida	46
Figura 8: Datos de entrada tiempo	61
Figura 9: Datos de salida temperatura	61
Figura 10: Ident Matlab	62
Figura 11: Configuración variable entrada y salida	62
Figura 12: Configuración Ident	63
Figura 13: Configuración polos y zeros en Ideen	63
Figura 14: Estimación función de transferencia	64
Figura 15: Función de transferencia Ident	64
Figura 16: Función de transferencia en conmand Window	65
Figura 17: Grafica de la función de trasferencia conmand Window	65
Figura 18: Planta en lazo abierto	66
Figura 19: Planta en lazo abierto set point de 65	66
Figura 20: Grafica en simulink y conmand window	67
Figura 21: Primer método Ziegler Nichols	67
Figura 22: Diagrama retroalimentación en control P	69
Figura 23: Configuración control P	70
Figura 24: Comportamiento grafica control P	70
Figura 25: Diagrama retroalimentación en control PI	71
Figura 26: Configuración control PI	71
Figura 27: Comportamiento grafica control PI	71
Figura 28: Diagrama retroalimentación en control PID	72
Figura 29: Configuración control PID	72
Figura 30: Comportamiento grafica control PID	72
Figura 31: Humedad relativa tomada con el hidrómetro	79
Figura 32: Humedad en base húmeda Vs Tiempo	84
Figura 33: Humedad en base seca Vs Tiempo	85
Figura 34: Durazno deshidratado sin pretratamiento	85
Figura 35: Humedad en base húmeda Vs Tiempo	86
Figura 36: Humedad en base seca Vs Tiempo	87
Figura 37: Durazno en metabisulfito	88
Figura 38: Durazno deshidratado	88
Figura 39: Fresa en lavado	89
Figura 40: Fresa cortada con el mismo espesor	89
Figura 41: Humedad en base húmeda Vs Tiempo	90
Figura 42: Humedad en base seca Vs Tiempo	90
Figura 43: Fresa deshidratada	91
Figura 44: Diagrama de bloque para la función de trasferencia	92

	ix
Figura 45: Planta en lazo abierto	95
Figura 46: Configuración set point	96
Figura 47: Planta con step de 65	96
Figura 48: Primer método Ziegler Nichols en el deshidratador	97
Figura 49: Diagrama retroalimentación en control P en el deshidratador	99
Figura 50: Configuración control P en el deshidratador	99
Figura 51: Comportamiento grafica control P en el deshidratador	100
Figura 52: Diagrama retroalimentación en control PI en el deshidratador	100
Figura 53: Configuración control PI en el deshidratador	101
Figura 54: Comportamiento grafica control PI en el deshidratador	101
Figura 55: Diagrama retroalimentación en control PID en el deshidratador	102
Figura 56: Configuración control PID en el deshidratador	102
Figura 57: Comportamiento grafica control PID en el deshidratador	102

Resumen

El presente proyecto se planteó el desarrollo de un sistema de control de temperatura que permita mejorar la operatividad, seguridad y confiabilidad del proceso de deshidratación a escala laboratorio.

Para lo anterior se realizó el modelamiento matemático del proceso de secado, utilizando los balances de materia y energía con el objeto de obtener la dinámica y caracterización del sistema. A partir de lo anterior es posible selección de las variables manipulables y posibles perturbaciones del sistema, permitiendo la implementación de un lazo de control de temperatura.

Finalmente, se obtienen diferentes alternativas de control, a partir de las cuales se realizó un proceso de selección, ejecución del lazo y la filosofía de control que mejor se ajustó a los requerimientos del sistema, que permitió la mejora del equipo y el proceso, además se realizó la verificación del sistema de control realizando ensayos respectivos con el deshidratador de bandejas S-001

Palabras clave:

Control de proceso, deshidratador de bandejas, seguridad del proceso, control de temperatura, modelamiento matemático.

ABSTRACT

The present project was proposed the development of a temperature control system that allows to improve the operation, safety and reliability of the dehydration process at laboratory scale.

For this, the mathematical modeling of the drying process was carried out, using the material and energy balances in order to obtain the dynamics and characterization of the system. From the above it is possible to select the manipulable variables and possible system disturbances, allowing the implementation of a temperature control loop.

Finally, different control alternatives are obtained, from which a selection process, loop execution and the control philosophy that best adjusted to the system requirements were made, which allowed the improvement of the equipment and the process. Verification of the control system was carried out by performing respective tests with the tray dehydrator S-001.

Keywords:

Process control, tray dehydrator, process safety, temperature control, mathematical modeling

1. INTRODUCCIÓN

La deshidratación es una técnica ampliamente utilizada para la conservación de alimentos, por medio de la deshidratación se permite la reducción de peso y volumen de la fruta, buscando que la vida útil de la fruta se alargue y que no pierda su sabor característico ni sus propiedades nutricionales.

Comprender el funcionamiento y las variables que afectan esta operación, es útil para que el equipo sea empleado de manera eficiente, el fortalecimiento de los conocimientos que debe desarrollar el ingeniero en el área de las operaciones unitarias.

Por tal motivo, se planteó el desarrollo del sistema de control de temperatura en el deshidratador de bandejas S-001, para ser usado en las prácticas de laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Pamplona.

Durante el desarrollo del proyecto se establecieron las condiciones de operación y se evaluaron con frutas como el durazno y la fresa, teniendo en cuenta que son las más producidas en la región del Norte de Santander

2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La deshidratación de frutas es un proceso en el cual se extrae el agua que contiene el alimento por medio de la circulación de aire caliente. Este proceso detiene el crecimiento de enzimas y microorganismos que se encargan de deteriorar la fruta. Muchos de estos microorganismos se destruyen cuando la temperatura en el deshidratador llega a 60°C. (Bretado, Torres & Domínguez, 2015)

En este momento la Universidad de Pamplona cuenta con un equipo a escala planta piloto denominado DESHIDRATADOR DE BANDEJAS S-001 que permite a través de su manejo, fortalecer el conocimiento en el área de operaciones unitarias. Debido a la complejidad de la operación y el control básico que tiene actualmente, se presenta una gran oportunidad para desarrollar estrategias de control avanzado.

Para un mejor funcionamiento del deshidratador se debe tener en cuenta que mientras mayor sea el diferencial de temperatura entre el medio calórico y el producto, mayor será la transferencia del calor al producto, permitiendo mayor extracción de humedad desde el interior. (Giraldo, 2014)

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el desarrollo de un sistema de control de temperatura para el deshidratador de bandejas S-001, que permita mejorar la operatividad del equipo, seguridad del proceso de deshidratación y confiabilidad de los resultados

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo General

Desarrollo de un sistema de control de temperatura para el deshidratador de bandejas S-001 del laboratorio de ingeniería química de la Universidad de Pamplona

2.1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar pruebas preliminares en el deshidratador para establecer parámetros operacionales a ser usados en el control del equipo
- Proponer la filosofía e instrumentación para el lazo de control de temperatura.
- Establecer estrategias para el control de temperatura dentro de la cámara de secado
- Seleccionar la estrategia de control más apropiada para la operación del equipo mediante el método Electra
- Realizar el sistema de control de temperatura para el deshidratador de bandejas S-001

3. MARTO TEORICO

En los campos de la ingeniería y afines a los procesos químicos, el funcionamiento de la unidad representa un paso básico en un proceso de producción y estas se conforman de operaciones unitarias.

Las operaciones unitarias en la ingeniería química consisten en cinco clases:

- Procesos de flujo de fluidos, incluyendo el transporte de fluidos, filtración, y fluidización de sólidos.
- Los procesos de transferencia de calor, incluyendo la evaporación y el intercambio de calor.
- Los procesos de transferencia de masa, incluyendo la absorción de gas, destilación, extracción, adsorción, y el secado.
- Los procesos termodinámicos, incluyendo la licuefacción de gas y refrigeración.
- Los procesos mecánicos, incluyendo el transporte de sólidos, trituración y pulverización, cribado y tamizado.

Dentro de este numeroso grupo, la operación unitaria de deshidratación se basa fundamentalmente en retirar la humedad de un producto evaporando el agua por medio de una corriente circundante de aire caliente. El contenido de humedad final retirada varía de producto a producto. (Jiménez & Pinos, 2014)

En cualquier proceso de deshidratación de alimentos se debe tomar en cuenta cuales son los aspectos energéticos y termodinámicos que se llevan a cabo durante el mismo.

Toda fruta o verdura está sujeta a cambios morfológicos producidos por factores termodinámicos estos a su vez producen cambios en los valores nutritivos y organolépticos de los alimentos. (Velázquez, 2007)

En todo proceso de deshidratación se pueden observar fenómenos de transferencia de calor y de masa simultáneos; la transferencia de calor del aire de deshidratación al sólido húmedo y la transferencia de masa del agua interna del sólido al aire de secado. Se debe tener en cuenta, además el fenómeno termodinámico básico que nos referimos al hablar de transferencia de calor el cual es conocido como: equilibrio térmico. (Hernández, 2015))

La velocidad de transferencia de calor de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción, cuando mayor es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de transferencia de calor; la transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de fluido. (Mendoza, 2007)

La velocidad de transferencia de calor por convección es siempre proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. La ley de enfriamiento de Newton representa a esta relación en forma matemática mediante la ecuación número 1

$$Q=hA(Tg-Tsup)$$

Ecuación 1

Dónde:

Q = velocidad de transmisión de calor.

hs = coeficiente de convección.

A = área a través de la cual tiene lugar el flujo de calor.

T_g = temperatura del aire.

T_{sup} = temperatura de la superficie que se está secando.

El coeficiente de convección se calcula mediante el número de Nusselt tal como se muestra en la ecuación 2.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{K} \quad \text{Ecuación 2}$$

Nu : Número de Nusselt

h : Coeficiente de convección

D : Diámetro interno de la tubería (MENDOZA, 2007)

3.1 LA PSICOMETRÍA EN EL PROCESO DE SECADO

La psicrometría, se define como "aquella parte de la ciencia que está en cierta forma íntimamente ligada a las propiedades termodinámicas del aire húmedo". (Ashrae, 1977.)

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de postcosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

Hay diversas propiedades termodinámicas fundamentales ligadas a las propiedades del aire húmedo. Hay dos propiedades independientes, además de la presión atmosférica necesaria para establecer el estado termodinámico del aire húmedo. (Asae, d271, 2, 1980.)

Tres propiedades se relacionan con la temperatura:

- Temperatura de bulbo seco.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Temperatura de punto de rocío.

Algunas propiedades termodinámicas caracterizan la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo:

- Presión de vapor.
- Razón de humedad.
- Humedad relativa.
- Grado de saturación.

Otras propiedades de fundamental importancia, relacionadas con el volumen ocupado por el aire y con la energía del aire, respectivamente, son:

- Volumen específico.
- La entalpía.

La entalpía y el volumen específico son propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua, pero para mayor comodidad se expresan sobre la base de una unidad de masa de aire seco. (Silva, m.b. 1972)

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico se pueden presentar adecuadamente en forma de gráfico, con el nombre de gráfico psicométrico, el cual se construye según una presión atmosférica determinada, aunque suele haber curvas de corrección para otras presiones. (Conorado, 1992).

Para simular las condiciones ideales para el deshidratador de bandeja S-001 la figura 1 se muestra una imagen de la carta psicométrica que arroja el programa, la cual fue elaborada con un rango de temperatura de 0 a 80°C, una humedad absoluta de 10 a 60 Kg de H₂O/Kg de aire seco y la presión de Pamplona (583 mmHg).

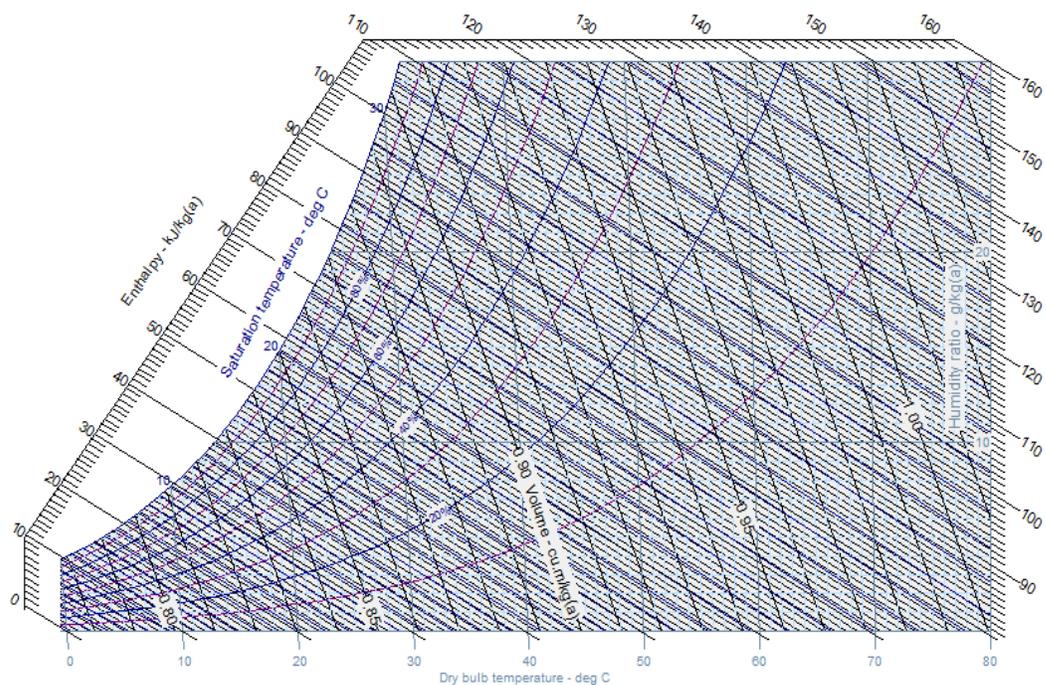


Figura 1: Gráfico psicrométrico

Fuente: programa *CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo*; Autores

Las propiedades de volumen específico, entalpia, y presión de vapor se utilizaron para calcular los balances de masa y energía como apoyo para el desarrollo del sistema de control de temperatura del deshidratador.

3.2 MÉTODO ELECTRE

El método ELECTRE (Elimination and Choice Translating Algorithm), desarrollado por Benayoun, Roy y Sussman (1966) ha sido objeto de muchas mejoras a lo largo de la historia. En primer lugar, fue mejorado al ELECTRE II [Roy y Bertier (1971b)], después al ELECTRE III [Roy (1978)] y al ELECTRE IV [Roy y Hugonnard (1982)].

ELECTRE se puede considerar uno de los métodos más usados durante estas últimas décadas. Este procedimiento permite reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes mediante una partición del conjunto eficiente en dos subconjuntos. Uno de alternativas muy favorables para el decisor y otro de alternativas menos favorables. En referencia al procedimiento, partiendo de una matriz de decisión, se utiliza la relación de sobre clasificación con el fin de obtener una matriz de superación. Una alternativa sobre clasifica a otra y pasa a formar parte del conjunto de alternativas más favorables cuando es al menos igual de buena, teniendo en cuenta el conjunto de atributos considerados. Para ello, es necesario que la concordancia entre ambas supere un índice, y la discordancia no supere otro, ambos establecidos previamente. (ROMERO, 1993-1996)

3.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA

Un controlador de temperatura es un instrumento usado para el control de la temperatura. El controlador de temperatura tiene una entrada procedente de un sensor de temperatura y tiene una salida que está conectada a un elemento de control tal como un calentador o ventilador. (Smith et al, 1991):

3.3.1 Controladores de acción proporcional, integral y derivativa (PID)

Es un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera, que, si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, mientras que, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de ofrecer una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones (Smith et al, 1991).

3.4 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRÓNICA

3.4.1 Electricidad

Un electrón es una partícula subatómica que posee carga eléctrica negativa. Por lo tanto, debido a la ley física de atracción entre sí de cargas eléctricas de signo opuesto (y de repulsión entre sí de cargas eléctricas de mismo signo), cualquier electrón siempre es atraído por una carga positiva equivalente.

Una consecuencia de este hecho es que si, por razones que no estudiaremos, en un extremo (también llamado “polo”) de un material conductor aparece un exceso de electrones y en el otro polo aparece una carencia de estos (equivalente a la existencia de “cargas positivas”), los electrones tenderán a desplazarse a través de ese conductor desde el polo negativo al positivo. A esta circulación de electrones por un material conductor se le llama “electricidad”.

La electricidad existirá mientras no se alcance una compensación de cargas entre los dos polos del conductor. Es decir, a medida que los electrones se desplacen de un extremo a otro, el polo negativo será cada vez menos negativo y el polo positivo será cada vez menos positivo, hasta llegar el momento en el que ambos extremos tengan una carga global neutra (es decir, estén en equilibrio). Llegados a esta situación, el movimiento de los electrones cesará. Para evitar esto, en la práctica se suele utilizar una fuente de alimentación externa (lo que se llama un “generador”) para restablecer constantemente la diferencia inicial de cargas entre los extremos del conductor, como si fuera una “bomba”. De esta manera, mientras el generador funcione, el desplazamiento de los electrones podrá continuar sin interrupción.

3.4.2 Voltaje

En el estudio del fenómeno de la electricidad existe un concepto fundamental que es el de voltaje entre dos puntos de un circuito eléctrico (también llamado “tensión”, “diferencia de potencial” o “caída de potencial”). Expliquémoslo con un ejemplo.

Si entre dos puntos de un conductor no existe diferencia de cargas eléctricas, el voltaje entre ambos puntos es cero. Si entre esos dos puntos aparece un desequilibrio de cargas (es decir, que en un punto hay un exceso de cargas negativas y en el otro una ausencia de ellas), aparecerá un voltaje entre ambos puntos, el cual será mayor a medida que la diferencia de cargas sea también mayor. Este voltaje es el responsable de la generación del flujo de electrones entre los dos puntos del conductor. No obstante, si los dos puntos tienen un desequilibrio de cargas entre sí pero están unidos mediante un material no conductor (lo que se llama un material “aislante”), existirá un voltaje entre ellos pero no habrá paso de electrones (es decir, no habrá electricidad).

Generalmente, se suele decir que el punto del circuito con mayor exceso de cargas positivas (o dicho de otra forma: con mayor carencia de cargas negativas) es el que tiene el “potencial” más elevado, y el punto con mayor exceso de cargas negativas es el que tiene el “potencial” más reducido. Pero no olvidemos nunca que el voltaje siempre se mide entre dos puntos: no tiene sentido decir “el voltaje en este punto”, sino “el voltaje en este punto respecto a este otro”; de ahí sus otros nombres de “diferencia de potencial” o “caída de potencial”.

3.4.3 Intensidad de corriente

La intensidad de corriente (comúnmente llamada “corriente” a secas) es una magnitud eléctrica que se define como la cantidad de carga eléctrica que pasa en un determinado tiempo a través de un punto concreto de un material conductor. Podemos imaginar que la intensidad de corriente es similar en cierto sentido al caudal de agua que circula por una tubería: que pase más o menos cantidad de agua por la tubería en un determinado tiempo sería análogo a que pase más o menos cantidad de electrones por un cable eléctrico en ese mismo tiempo.

Su unidad de medida es el amperio (A), pero también podemos hablar de miliamperios ($1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}$), de microamperios ($1 \text{ }\mu\text{A} = 0,001 \text{ mA}$), o incluso de nanoamperios ($1 \text{ nA} = 0,001 \text{ }\mu\text{A}$). Tal como ya hemos comentado, se suele considerar que en un circuito la corriente fluye del polo positivo (punto de mayor tensión) al polo negativo (punto de menor tensión) a través de un material conductor.

3.4.4 Corriente continua

Hay que distinguir dos tipos fundamentales de circuitos cuando hablamos de magnitudes como el voltaje o la intensidad: los circuitos de corriente continua (o circuitos DC, del inglés “Direct Current”) y los circuitos de corriente alterna (o circuitos AC, del inglés “Alternating Current”).

Llamamos corriente continua a aquella en la que los electrones circulan a través del conductor siempre en la misma dirección (es decir, en la que los extremos de mayor y menor potencial –o lo que es lo mismo, los polos positivo y negativo– son siempre los mismos). Aunque comúnmente se identifica la corriente continua con la corriente constante

(por ejemplo, la suministrada por una batería), estrictamente solo es continua toda corriente que, tal como acabamos de decir, mantenga siempre la misma polaridad.

3.4.5 Corriente alterna

Hay que distinguir dos tipos fundamentales de circuitos cuando hablamos de magnitudes como el voltaje o la intensidad: los circuitos de corriente continua (o circuitos DC, del inglés “Direct Current”) y los circuitos de corriente alterna (o circuitos AC, del inglés “Alternating Current”).

Llamamos corriente alterna a aquella en la que la magnitud y la polaridad del voltaje (y por tanto, las de la intensidad también) varían cíclicamente. Esto último implica que los polos positivo y negativo se intercambian alternativamente a lo largo del tiempo y, por tanto, que el voltaje va tomando valores positivos y negativos con una frecuencia determinada.

La corriente alterna es el tipo de corriente que llega a los hogares y empresas provenientes de la red eléctrica general. Esto es así porque la corriente alterna es más fácil y eficiente de transportar a lo largo de grandes distancias (ya que sufre menos pérdidas de energía) que la corriente continua. Además, la corriente alterna puede ser convertida a distintos valores de tensión (ya sea aumentándolos o disminuyéndolos según nos interese a través de un dispositivo llamado transformador) de una forma más sencilla y eficaz.

3.4.6 Resistencia eléctrica

Podemos definir la resistencia eléctrica interna de un objeto cualquiera (aunque normalmente nos referiremos a algún componente electrónico que forme parte de nuestros circuitos) como su capacidad para oponerse al paso de la corriente eléctrica a través de él. Es decir, cuanto mayor sea la resistencia de ese componente, más dificultad tendrán los

electrones para atravesarlo, hasta incluso el extremo de imposibilitar la existencia de electricidad.

Esta característica depende entre otros factores del material con el que está construido ese objeto, por lo que podemos encontrarnos con materiales con poca o muy poca resistencia intrínseca (los llamados “conductores”, como el cobre o la plata) y materiales con bastante o mucha resistencia (los llamados “aislantes”, como la madera o determinados tipos de plástico, entre otros). No obstante, hay que insistir en que aunque un material sea conductor, siempre poseerá inevitablemente una resistencia propia que evita que se transfiera el 100% de la corriente a través de él, por lo que incluso un simple cable de cobre tiene cierta resistencia interna (normalmente despreciable, eso sí) que reduce el flujo de electrones original.

La unidad de medida de la resistencia de un objeto es el ohmio (Ω). También podemos hablar de kilohmios ($1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega$), de megaohmios ($1 \text{ M}\Omega = 1000 \text{ k}\Omega$), etc.

3.4.7 Potencia

Podemos definir la potencia de un componente eléctrico/electrónico como la energía consumida por este en un segundo. Sí, no obstante, estamos hablando de una fuente de alimentación, con la palabra potencia nos referiremos entonces a la energía eléctrica aportada por esta al circuito en un segundo. En ambos casos (ya sea potencia consumida o generada), la potencia es un valor intrínseco propio del componente o generador, respectivamente. Su unidad de medida es el vatio (W), pero también podemos hablar de milivatios ($1 \text{ mW} = 0,001 \text{ W}$), o kilovatios ($1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$).

A partir de la potencia conocida propia del componente/generador y del tiempo que este esté funcionando, se puede conocer la energía consumida/aportada total, mediante la expresión: $E = P t$.

Cuando una fuente de alimentación aporta una determinada energía eléctrica, esta puede ser consumida por los distintos componentes del circuito de diversas maneras: la mayoría de veces es gastada en forma de calor debido al efecto de las resistencias internas intrínsecas de cada componente (el llamado “efecto Joule”), pero también puede ser consumida en forma de luz (si ese componente es una bombilla, por ejemplo) o en forma de movimiento (si ese componente es un motor, por ejemplo), o en forma de sonido (si ese componente es un altavoz, por ejemplo), o en una mezcla de varias.

Podemos calcular la potencia consumida por un componente eléctrico si sabemos el voltaje al que está sometido y la intensidad de corriente que lo atraviesa, utilizando la fórmula $P = V \cdot I$. Por ejemplo, una bombilla sometida a 220 V por la que circula 1 A consumirá 220 W. Por otro lado, a partir de la Ley de Ohm podemos deducir otras dos fórmulas equivalentes que nos pueden ser útiles si sabemos el valor de la resistencia R interna del componente: $P = I^2 \cdot R$ o también $P = V^2 / R$.

Finalmente, hay que saber que los materiales conductores pueden soportar hasta una cantidad máxima de potencia consumida, más allá de la cual se corre el riesgo de sobrecalentarlos y dañarlos.

3.4.8 Señales análogas digitales

Podemos clasificar las señales eléctricas (ya sean voltajes o intensidades) de varias maneras según sus características físicas. Una de las clasificaciones posibles es distinguir entre señales digitales y señales analógicas.

Señal digital es aquella que solo tiene un número finito de valores posibles (lo que se suele llamar “tener valores discretos”). Por ejemplo, si consideramos como señal el color emitido por un semáforo, es fácil ver que esta es de tipo digital, porque solo puede tener tres valores concretos, diferenciados y sin posibilidad de transición progresiva entre ellos: rojo, ámbar y verde.

Señal analógica es aquella que tiene infinitos valores posibles dentro de un rango determinado (lo que se suele llamar “tener valores continuos”). La mayoría de magnitudes físicas (temperatura, sonido, luz...) son analógicas, así como también las más específicamente eléctricas (voltaje, intensidad, potencia...) porque todas ellas, de forma natural, pueden sufrir variaciones continuas sin saltos.

3.4.9 Divisor de tensión

El “divisor de tensión” no es más que un circuito formado por una resistencia conectada en serie con cualquier otro dispositivo eléctrico. Su intención es reducir la tensión aplicada a dicho dispositivo, estableciéndola en un valor seguro para no dañarlo. Dicho de otra forma: el “divisor de tensión” sirve para obtener un voltaje menor que un cierto voltaje original.

3.4.10 Resistencias de pull-down

Muchas veces, los circuitos eléctricos tienen “entradas” por las que reciben una señal eléctrica del exterior (de tipo binario) que no tiene nada que ver con la señal de

alimentación obtenida de la fuente. Estas señales externas pueden servir para multitud de cosas: para activar o desactivar partes del circuito, para enviar al circuito información de su entorno, etc.

Las resistencias “pull-up” (y “pull-down”) son resistencias normales, solo que llevan ese nombre por la función que cumplen: sirven para asumir un valor por defecto de la señal recibida en una entrada del circuito cuando por ella no se detecta ningún valor concreto (ni ALTO ni BAJO), que es lo que ocurre cuando la entrada no está conectada a nada (es decir, está “al aire”). Así pues, este tipo de resistencias aseguran que los valores binarios recibidos no fluctúan sin sentido en ausencia de señal de entrada.

En las resistencias “pull-up” el valor que se asume por defecto cuando no hay ningún dispositivo externo emisor de señal conectado a la entrada es ALTO y en las “pull-down” es el valor BAJO, pero ambas persiguen el mismo objetivo, así que la elección de una resistencia de tipo “pull-up” o “pull-down” dependerá de las circunstancias particulares de nuestro montaje. La diferencia entre unas y otras está en su ubicación dentro del circuito: las resistencias “pull-up” se conectan directamente a la fuente de señal externa y las “pull-down” directamente a tierra.

3.4.11 Sistema electrónico

Un sistema electrónico es un conjunto de: sensores, circuitería de procesamiento y control, actuadores y fuente de alimentación.

Los sensores obtienen información del mundo físico externo y la transforman en una señal eléctrica que puede ser manipulada por la circuitería interna de control. Existen sensores de todo tipo: de temperatura, de humedad, de movimiento, de sonido (micrófonos), etc.

Los circuitos internos de un sistema electrónico procesan la señal eléctrica convenientemente. La manipulación de dicha señal dependerá tanto del diseño de los diferentes componentes hardware del sistema, como del conjunto lógico de instrucciones (es decir, del “programa”) que dicho hardware tenga pregrabado y que sea capaz de ejecutar de forma autónoma.

Los actuadores transforman la señal eléctrica acabada de procesar por la circuitería interna en energía que actúa directamente sobre el mundo físico externo. Ejemplos de actuadores son: un motor (energía mecánica), una bombilla (energía lumínica), un altavoz (energía acústica), etc.

La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para que se pueda realizar todo el proceso descrito de “obtención de información del medio procesamiento <-> actuación sobre el medio”. Ejemplos de fuentes son las pilas, baterías, adaptadores AC/DC, etc.

3.4.12 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado o “chip” (es decir, un dispositivo electrónico que integra en un solo encapsulado un gran número de componentes) que tiene la característica de ser programable. Es decir, que es capaz de ejecutar de forma autónoma una serie de instrucciones previamente definidas por nosotros. En el diagrama representativo de un sistema electrónico, el microcontrolador sería el componente principal de la circuitería de procesamiento y control.

3.5 ARDUINO

3.5.1 ¿QUE ES UN ARDUINO?

Una placa hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines-hembra (los cuales están unidos internamente a las patillas de E/S del microcontrolador) que permiten conectar allí de forma muy sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores.

Cuando hablamos de “placa hardware” nos estamos refiriendo en concreto a una PCB (del inglés “printed circuit board”, o sea, placa de circuito impreso). Las PCBs son superficies fabricadas de un material no conductor (normalmente resinas de fibra de vidrio reforzada, cerámica o plástica) sobre las cuales aparecen laminadas (“pegadas”) pistas de material conductor (normalmente cobre). Las PCBs se utilizan para conectar eléctricamente, a través de los caminos conductores, diferentes componentes electrónicos soldados a ella. Una PCB es la forma más compacta y estable de construir un circuito electrónico (en contraposición a una breadboard, perfboard o similar) pero, al contrario que estas, una vez fabricada, su diseño es bastante difícil de modificar. Así pues, la placa Arduino no es más que una PCB que implementa un determinado diseño de circuitería interna.

No obstante, cuando hablamos de “placa Arduino”, deberíamos especificar el modelo concreto, ya que existen varias placas Arduino oficiales, cada una con diferentes características (como el tamaño físico, el número de pines-hembra ofrecidos, el modelo de microcontrolador incorporado –y como consecuencia, entre otras cosas, la cantidad de memoria utilizable–, etc.). Conviene conocer estas características para identificar qué placa Arduino es la que nos convendrá más en cada proyecto.

3.5.2 Lenguaje de programación libre

Un lenguaje de programación libre. Por “lenguaje de programación” se entiende cualquier idioma artificial diseñado para expresar instrucciones (siguiendo unas determinadas reglas sintácticas) que pueden ser llevadas a cabo por máquinas. Concretamente dentro del lenguaje Arduino, encontramos elementos parecidos a muchos otros lenguajes de programación existentes (como los bloques condicionales, los bloques repetitivos, las variables, etc.), así como también diferentes comandos –asimismo llamados “órdenes” o “funciones” – que nos permiten especificar de una forma coherente y sin errores las instrucciones exactas que queremos programar en el microcontrolador de la placa. Estos comandos los escribimos mediante el entorno de desarrollo Arduino.

Tanto el entorno de desarrollo como el lenguaje de programación Arduino están inspirado en otro entorno y lenguaje libre preexistente: Processing (<http://www.processing.org>), desarrollado inicialmente por Ben Fry y Casey Reas. Que el software Arduino se parezca tanto a Processing no es casualidad, ya que este está especializado en facilitar la generación de imágenes en tiempo real, de animaciones y de interacciones visuales, por lo que muchos profesores del Instituto de Diseño de Ivrea lo utilizaban en sus clases. Como fue en ese centro donde precisamente se inventó Arduino es natural que ambos entornos y lenguajes guarden bastante similitud. No obstante, hay que aclarar que el lenguaje Processing está construido internamente con código escrito en lenguaje Java, mientras que el lenguaje Arduino se basa internamente en código C/C++.

Con Arduino se pueden realizar multitud de proyectos de rango muy variado: desde robótica hasta domótica, pasando por monitorización de sensores ambientales, sistemas de

navegación, telemática, etc. Realmente, las posibilidades de esta plataforma para el desarrollo de productos electrónicos son prácticamente infinitas y tan solo están limitadas por nuestra imaginación.

3.5.3 Origen de Arduino

Arduino nació en el año 2005 en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea (Italia), centro académico donde los estudiantes se dedicaban a experimentar con la interacción entre humanos y diferentes dispositivos (muchos de ellos basados en microcontroladores) para conseguir generar espacios únicos, especialmente artísticos. Arduino apareció por la necesidad de contar con un dispositivo para utilizar en las aulas que fuera de bajo coste, que funcionase bajo cualquier sistema operativo y que contase con documentación adaptada a gente que quisiera empezar de cero. La idea original fue, pues, fabricar la placa para uso interno de la escuela.

No obstante, el Instituto se vio obligado a cerrar sus puertas precisamente en 2005. Ante la perspectiva de perder en el olvido todo el desarrollo del proyecto Arduino que se había ido llevando a cabo durante aquel tiempo, se decidió liberarlo y abrirlo a “la comunidad” para que todo el mundo tuviera la posibilidad de participar en la evolución del proyecto, proponer mejoras y sugerencias y mantenerlo “vivo”. Y así ha sido: la colaboración de muchísima gente ha hecho que Arduino poco a poco haya llegado a ser lo que es actualmente: un proyecto de hardware y software libre de ámbito mundial.

El principal responsable de la idea y diseño de Arduino, y la cabeza visible del proyecto es el llamado “Arduino Team”, formado por Massimo Banzi (profesor en aquella época del Instituto Ivrea), David Cuartielles (profesor de la Escuela de Artes y Comunicación de

la Universidad de Mälmo, Suecia), David Mellis (por aquel entonces estudiante en Ivrea y actualmente miembro del grupo de investigación High-Low Tech del MIT Media Lab), Tom Igoe (profesor de la Escuela de Arte Tisch de Nueva York), y Gianluca Martino (responsable de empresa fabricante de los prototipos de las placas, cuya web oficial es: <http://www.smartprojects.it>).

3.5.4 Software libre

Según la Free Software Foundation (<http://www.fsf.org>), organización encargada de fomentar el uso y desarrollo del software libre a nivel mundial, un software para ser considerado libre ha de ofrecer a cualquier persona u organización cuatro libertades básicas e imprescindibles:

Libertad 0: la libertad de usar el programa con cualquier propósito y en cualquier sistema informático.

Libertad 1: la libertad de estudiar cómo funciona internamente el programa, y adaptarlo a las necesidades particulares. El acceso al código fuente es un requisito previo para esto.

Libertad 2: la libertad de distribuir copias.

Libertad 3: la libertad de mejorar el programa y hacer públicas las mejoras a los demás, de modo que toda la comunidad se beneficie. El acceso al código fuente es un requisito previo para esto.

3.5.5 Hardwar libre

El hardware libre (también llamado “open-source” o “de fuente abierta”) comparte muchos de los principios y metodologías del software libre. En particular, el hardware libre permite que la gente pueda estudiarlo para entender su funcionamiento, modificarlo, reutilizarlo,

mejorarlo y compartir dichos cambios. Para conseguir esto, la comunidad ha de poder tener acceso a los ficheros esquemáticos del diseño del hardware en cuestión (que son ficheros de tipo CAD). Estos ficheros detallan toda la información necesaria para que cualquier persona con los materiales, herramientas y conocimientos adecuados pueda reconstruir dicho hardware por su cuenta sin problemas, ya que consultando estos ficheros se puede conocer qué componentes individuales integran el hardware y qué interconexiones existen entre cada uno de ellos.

La placa Arduino es hardware libre porque sus ficheros esquemáticos están disponibles para descargar de la página web del proyecto con la licencia Creative Commons Attribution Share-Alike (<http://es.creativecommons.org/licencia>), la cual es una licencia libre que permite realizar trabajos derivados tanto personales como comerciales (siempre que estos den crédito a Arduino y publiquen sus diseños bajo la misma licencia). Así pues, uno mismo se puede construir su propia placa Arduino “a mano”. No obstante, lo más normal es comprarlas de un distribuidor ya pre ensamblado y listo la placa Arduino, aunque sea libre, no puede ser gratuita, ya que es un objeto físico y su fabricación cuesta dinero.

3.6 PROTOCOLO COMUNICACIÓN

Cuando se desea transmitir un conjunto de datos desde un componente electrónico a otro, se puede hacer de múltiples formas. Una de ellas es estableciendo una comunicación “serie”; en este tipo de comunicación la información es transmitida bit a bit (uno tras otro) por un único canal, enviando por tanto un solo bit en cada momento. Otra manera de transferir datos es mediante la llamada comunicación “paralela”, en la cual se envían varios bits simultáneamente, cada uno por un canal separado y sincronizado con el resto.

3.6.1 I2C

I2C (Inter-Integrated Circuit, también conocido con el nombre de TWI –de “TWo-wIre”, literalmente “dos cables” en inglés–): es un sistema muy utilizado en la industria principalmente para comunicar circuitos integrados entre sí. Su principal característica es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una (llamada línea “SDA”) sirve para transferir los datos (los 0s y los 1s) y otra (llamada línea “SCL”) sirve para enviar la señal de reloj. En realidad también se necesitarían dos líneas más: la de alimentación y la de tierra común, pero estas ya se presuponen existentes en el circuito.

Por “señal de reloj” se entiende una señal binaria de una frecuencia periódica muy precisa que sirve para coordinar y sincronizar los elementos integrantes de una comunicación (es decir, los emisores y receptores) de forma que todos sepan cuándo empieza, cuánto dura y cuándo acaba la transferencia de información. En hojas técnicas y diagramas a la señal de reloj en general se le suele describir como CLK (del inglés “clock”).

Cada dispositivo conectado al bus I2C tiene una dirección única que lo identifica respecto al resto de dispositivos, y puede estar configurado como “maestro” o como “esclavo”. Un dispositivo maestro es el que inicia la transmisión de datos y además genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo, esta característica se la pueden ir intercambiando ordenadamente los dispositivos que tengan esa capacidad.

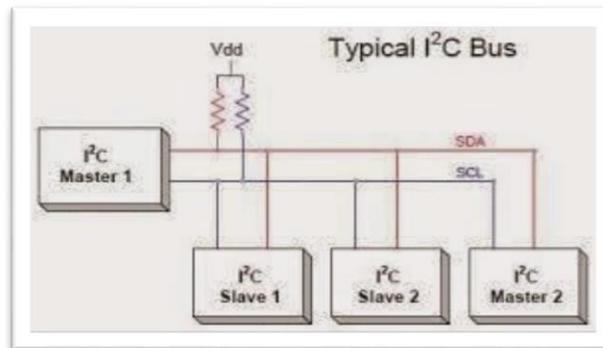


Figura 2. Comunicación I2C
Autores

Tal como se muestra en la figura 2, para funcionar correctamente tanto la línea “SDA” como la “SCL” necesitan estar conectadas mediante una resistencia “pull-up” a la fuente de alimentación común, la cual puede proveer un voltaje generalmente de 5 V o 3,3 V (aunque sistemas con otros voltajes pueden ser posibles).

La velocidad de transferencia de datos es de 100 Kbits por segundo en el modo estándar (aunque también se permiten velocidades de hasta 3,4 Mbit/s). No obstante, al haber una única línea de datos, la transmisión de información es “half duplex” (es decir, la comunicación solo se puede establecer en un sentido al mismo tiempo) por lo que en el momento que un dispositivo empiece a recibir un mensaje, tendrá que esperar a que el emisor deje de transmitir para poder responderle.

3.6.2 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface): al igual que el sistema I²C, el sistema de comunicación SPI es un estándar que permite controlar (a cortas distancias) casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie sincronizado (es decir, regulado por un reloj). Igualmente, un dispositivo conectado al bus SPI puede ser “maestro” –en inglés,

“master” – o “esclavo” –en inglés, “slave“–, donde el primero es el que inicia la transmisión de datos y además genera la señal de reloj (aunque, como con I²C , con SPI tampoco es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo) y el segundo se limita a responder.

La figura 3 muestra la mayor diferencia entre el protocolo SPI y el I²C es que el primero requiere de cuatro líneas (“cables”) en vez de dos. Una línea (llamada normalmente “SCK”) envía a todos los dispositivos la señal de reloj generada por el maestro actual; otra (llamada normalmente “SS”) es la utilizada por ese maestro para elegir en cada momento con qué dispositivo esclavo se quiere comunicar de entre los varios que puedan estar conectados (ya que solo puede transferir datos con un solo esclavo a la vez); otra (llamada normalmente “MOSI”) es la línea utilizada para enviar los datos –0s y 1s– desde el maestro hacia el esclavo elegido; y la otra (llamada normalmente “MISO”) es la utilizada para enviar los datos en sentido contrario: la respuesta de ese esclavo al maestro. Es fácil ver que, al haber dos líneas para los datos la transmisión de información es “full duplex” (es decir, que la información puede ser transportada en ambos sentidos a la vez).

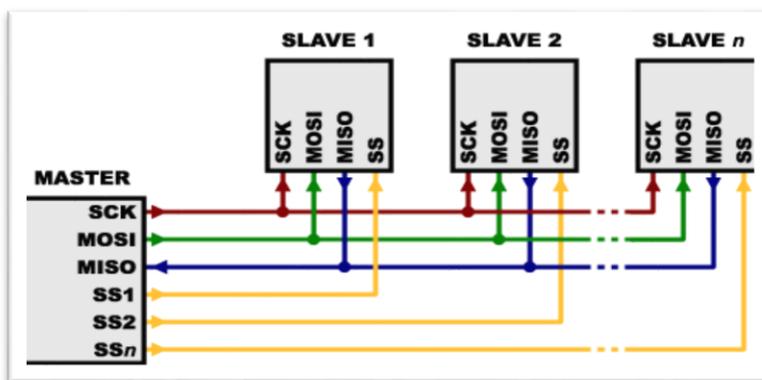


Figura 3: Comunicación SPI
Autores

3.7 ESTADO DEL ARTE

(Ivonne & Jorge, 2006) lograron el diseño de un secador de polen que está en capacidad de entregar una tonelada de producto seco al mes, de bajo consumo de energía, con la posibilidad de aumentar su producción, que cumple normas higiénica y sanitarias para el procesamiento de alimentos y que cuenta con un control y supervisión automáticos de temperatura.

Otra investigación importante fue desarrollada en la Escuela de Ingeniería Química en Ecuador, sobre el diseño y construcción de un deshidratador de bandejas con control automático que trabajo con gas GPL, para la deshidratación de la pulpa de cocona *Solanum sessiliforum* (naranjilla silvestre) (Angel & Marcelo, 2009)

(Giraldo, 2014), estableció las variables a controlar en un deshidratador, teniendo en cuenta las características del fluido de servicio y el producto a deshidratar, tales como la temperatura y la humedad relativa, la temperatura debe estar en un nivel óptimo y constante, y que el aire no debe estar saturado debido a que entre mayor humedad tenga el aire menor porcentaje de agua podrá extraer de la fruta.

(Vique, 2016), Se realizó el diseño e implementación de un sistema SCADA para controlar el deshidratador de bandejas a gas de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Con la ayuda del Controlador Lógico Programable (PLC) se realizó el control del sistema, el cual trabaja en base a la información recibida por los

sensores de temperatura PT 100, activando o desactivando la electroválvula de GLP, o a su vez el ventilador para hacer circular el aire dentro de la cámara de deshidratación con el fin de lograr una temperatura estable para el deshidratado.

Las más recientes investigaciones son del 2017, una de ellas se patentó en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicada con el desarrollo de un sistema de deshidratado de fruta mediante el control de temperatura para Pymes, el cual realizaron un equipo con las ventajas técnicas de los equipos industriales y un precio tan cómodo como un equipo doméstico. Esto es fue posible reduciendo los costos en la parte técnica dado que la reducción en la fabricación no es tan significativa, el controlador utilizado es un mini PLC. (Bueno & Paredes, 2017).

En este mismo año en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se desarrolló un sistema de control y monitoreo mediante recetas industriales (RECIPE-BATCH), para un deshidratador a vapor de vegetales, en la Facultad de Ciencias. Se aplicó el método heurístico para su desarrollo, en primer lugar, se determinaron los parámetros necesarios para la deshidratación a partir del análisis del diseño de construcción del equipo. Se procedió a restablecer el funcionamiento del deshidratador, evaluándolo mediante un estado técnico del equipo, de lo cual se determinó y aplicó reparaciones en el mismo. En el diseño e implementación del sistema de control y monitoreo se suministró la configuración y programación de: el controlador lógico programable (PLC), la interfaz hombre máquina (HMI) y variador de frecuencia, además fue necesario implementar la

comunicación vía Ethernet entre HMI y PLC, como último paso se empleó la técnica RECIPE-BATCH dentro del HMI. (Castañeda & Sanunga, 2017)

En Colombia se desarrolló una investigación en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, la implementación de un prototipo de deshidratador híbrido de mango para el municipio de Anapoima ubicado en el departamento de Cundinamarca. En el desarrollo del prototipo se incluyeron aspectos determinantes para su funcionamiento tales como la escogencia del tipo de deshidratador, dimensionamiento teniendo en cuenta aspectos propios del lugar de ubicación y la adecuada selección del método de control de temperatura y humedad. (Viveros & Castellanos, 2017)

4. METODOLOGIA

4.1 GENERALIDADES

Existen diversos métodos para la conservación de la fruta, entre uno de los más utilizados se encuentra la deshidratación por medio de aire caliente, debido a que el aire caliente no maltrata las propiedades de la fruta como lo pueden llegar hacer otros métodos de conservación como la esterilización, la adición de aditivos, entre otros.

Entre los equipos para deshidratar frutas se encuentra el deshidratador de bandejas, el cual es un equipo relativamente sencillo en cuanto a operación y construcción, donde, las propiedades del aire son de muy importantes para el uso del equipo y para ello se dispone de la carta psicométrica, brindando información del aire para establecer variables de operación. (Santana & Cubillos, 2016)

4.1.1 PRETRATAMIENTOS

A fin de mejorar la calidad del producto y evitar el pardeamiento, es frecuente, en la mayoría de los sistemas de secado, que el producto sea sometido a algún tipo de pretratamiento. En investigaciones realizadas se ha determinado que el pretratamiento reduce el tiempo de secado y produce un producto seco de buena calidad (Kingsly, Goyal, Manikantan, & Ilyas, 2007). En la tabla 1 se presentan los diferentes tipos de pretratamientos. (Echeverriarza, 2005)

Tabla 1: Pretratamientos

PRETRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Escaldado (blanqueamiento)	Inactiva enzimas, elimina gases de las superficies vegetales y de los espacios intercelulares, reduce la carga inicial de microorganismos, limpia los alimentos crudos, facilita las operaciones preliminares, tales como pelado y cortado, y fundamentalmente mejora el color, textura, sabor y aroma, bajo condiciones óptimas.	Puede producir cambios en la textura, color, sabor y aroma, como consecuencia del calentamiento, aumenta la pérdida de sólidos solubles, especialmente en el escaldado con agua, puede cambiar el estado químico y físico de nutrientes y vitaminas, produce impactos ambientales negativos, tales como gran utilización de agua y energía, y problemas de eliminación de efluentes.
Sulfitado	Menor contaminación atmosférica, menor riesgo de toxicidad para el personal que manipula el	Contienen residuos de SO ₂ que pueden provocar broncoespasmos en

	<p>producto, mayor control sobre el proceso de azufrado, menor tiempo de azufrado, y menores pérdidas de SO₂ durante el secado.</p>	<p>personas asmáticas o alérgicas.</p>
<p>Deshidratado Osmótico</p>	<p>Inhibir la actividad enzimática, retener el color y los aromas naturales del alimento, mejorar el rendimiento (mayor peso y volumen) y la calidad final del producto (mejor textura), así como también colaborar en la conservación del mismo.</p>	<p>Acentuar el sabor salado o dulce, o disminuir la acidez del producto, lo cual, en algunos casos, no es deseable</p>
<p>Solución de inmersión con aditivos:</p>	<p>Mejorar la calidad del producto y las características de la deshidratación.</p>	<p>Compuestos presentan otros efectos indeseados como la reducción en la asimilación de la vitamina B1, dolores de cabeza</p>

		crónicos y alteraciones en la memoria.
--	--	--

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA FRUTA

Para el desarrollo de este proyecto se emplearon dos frutas con mayor producción en la región de Norte de Santander.

Durazno (*Prunus pérsica*)

También conocido como melocotón, originario de Asia, el Durazno (*Prunus persica*) forma parte de la familia de las rosáceas. Popular en Colombia ya sea de cultivos nacionales o importados. Es un fruto muy jugoso de agradable aroma y exquisito sabor. Tiene una piel de textura muy suave de color amarillo con tonos o betas de color rojo.

El durazno, se consume fresco, en almíbar, conserva, mermelada, gelatinas, jugos, helado, dulces, postres y como base o ingrediente para muchas otras preparaciones. (Ana Cruz Morillo Coronado, 2014).

En Colombia se cultiva durazno en los departamentos de Cundinamarca, Santander, Antioquia, Boyacá, Caldas y Nariño, siendo Boyacá el de mayor producción a nivel nacional. En la provincia de Pamplona se encuentra un área sembrada de 830 ha de duraznero, distribuidas de la siguiente forma: en el municipio de Pamplonita 82,3 ha, en Pamplona 43,6 ha, en Chitagá 236,5 ha, en Cácosta 210,5 ha y en el municipio de Silos 170,8 ha. (Quevedo-García, Darghan, & Fischer, 2017).

En la tabla 2 se observa la composición nutricional del durazno.

Tabla 2. Composición nutricional del durazno.

Durazno (<i>Prunus pérsica</i>)			
Agua	88,87 %	Vitamina C	7 mg
Calorías	39 kcal	Vitamina A	16 mg
Proteínas	0,91 g	Ac. Grasos mono insaturado	0,07 g
Grasas total	0,25 g	Ac. Grasos poli-insaturado	0,09 g
Carbohidratos	9,54 g	Ac. Grasos saturados	0,02 g
Fibra dieta total	1,5 g	Colesterol	0 mg
Ceniza	0,43 g	Potasio	190 mg
Calcio	6 mg	Sodio	0 mg
Fosforo	20 mg	Zinc	0,17 mg
Hierro	0,25 mg	Magnesio	9 mg
Tiamina	0,02 mg	Vitamina B6	0,03 mg
Riboflavina	0,03 mg	Vitamina B12	0 mg
Niacina	0,81 mg	Ac. Fólico	0 mcg

Fuentes: MENCHÚ & MÉNDEZ (2012).

Fresa (*Fragaria ananassa*)

La fresa *fragaria ananassa* es proveniente de un cruce entre especies como la *F. virginiana* y la *F. chiloensis* y actualmente se ha convertido en una de las frutas más cultivadas a nivel mundial, debido a su adaptación a las diferentes condiciones climáticas, no obstante, su predominio se encuentra en zonas templadas.

Las fresas se caracterizan por tener una alta humedad en relación con otras frutas (90-93%), posee alto contenido de vitamina C, cantidades apreciables de manganeso, potasio, hierro, vitamina A y calcio; es baja en calorías y alta en fibras; tiene niveles considerables de vitamina B6 y vitamina K; contiene elevadas cantidades de antioxidantes y compuestos radicales libres; posee ácido elágico que se considera un buen agente contra el cáncer; corta la absorción del VIH en las células así como la actividad enzimática en el ADN del VIH; ayuda a volver más espesa la sangre y disminuye las hemorragias; contribuye en el

mantenimiento del equilibrio de las lipoproteínas; posee el más alto poder inhibidor del colesterol malo o LDL que otras bayas investigadas; es la tercera fruta más efectiva para la prevención de la oxidación de las células, tal vez a causa de su elevado contenido de antocianina.(Ferrucho & Ruíz, 2013)

El cultivo de fresa en Colombia presentó una producción aproximada a las 45.000 toneladas. El principal departamento productor fue Cundinamarca, con el 63,4%; seguido de Antioquia con el 23,8% y Norte de Santander, con 6,98% de producción nacional. En la provincia de Pamplona para el cultivo de fresa se destinaron unas 33 hectáreas con una producción de 952 toneladas y unos rendimientos de 32 toneladas por hectárea, si bien el primer cultivador y productor de fresa fue Silos, el municipio de Pamplona ocupa el segundo puesto. (Quevedo-García, Darghan, & Fischer, 2017). En la tabla 3 se observa la composición nutricional de la fresa.

Tabla 3. Composición nutricional de la fresa.

Fresa (<i>Fragaria ananassa</i>)			
Agua	90,95 %	Vitamina C	57 mg
Calorías	32 kcal	Vitamina A	1 mg
Proteínas	0,67 g	Ac. Grasos mono insaturado	0,04 g
Grasas totales	0,3 g	Ac. Grasos poli-insaturado	0,16 g
Carbohidratos	7,68 g	Ac. Grasos saturados	0,01 g
Fibra dieta total	2 g	Colesterol	0 mg
Ceniza	0,4 g	Potasio	153 mg
Calcio	16 mg	Sodio	1 mg
Fosforo	24 mg	Zinc	0,14 mg
Hierro	0,42 mg	Magnesio	13 mg
Tiamina	0,02 mg	Vitamina B6	0,05 mg
Riboflavina	0,02 mg	Vitamina B12	0 mg
Niacina	0,39 mg	Ac. Fólico	24 mcg

Fuentes: MENCHÚ & MÉNDEZ (2012).

4.3 BALANCE DE MASA Y ENERGIA

4.3.1 Balance de masa

En muchos casos se desea controlar la temperatura del bulbo húmedo a la cual ocurre el secado del sólido. Además, como los costos energéticos suelen ser importantes para calentar el aire de secado, se puede recircular con el fin de reducir los costos y controlar la humedad. Parte del aire caliente húmedo de salida se combina con aire fresco y se recircula el secador. Esto se muestra en la figura 4.

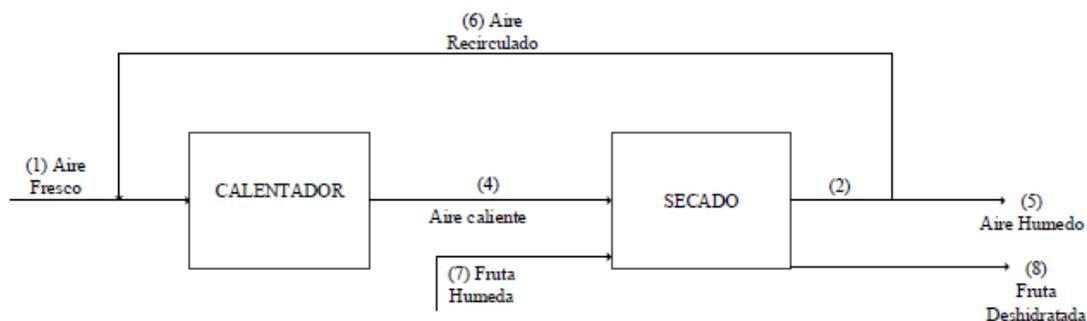


Figura 4: Diagrama de bloques del proceso con recirculación
Autores

Para calcular la cantidad de fruta deshidratada se deben hacer los siguientes balances

$$m_7 (1-X_7) = m_8 (1-X_8) \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

m_7 y m_8 : Masa de las Corrientes 7 y 8

X_7 y X_8 : Fracción másica de agua en la fruta de las Corrientes 7 y 8

Para calcular el agua retirada se restan las cantidades de agua de la fruta inicial y el producto deshidratado.

$$(m_7 * X_7) - (m_8 * X_8) \quad \text{Ecuación 4}$$

La cantidad de aire requerido se calcula con la siguiente ecuación 5:

$$\dot{m}_1 = \frac{H_{2O_{out}} \text{ (Kg)}}{\Delta H_a \text{ (Kg H}_2\text{O/Kg as)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

\dot{m}_1 : Masa de aire seco en la corriente 1

$H_{2O_{out}}$: Cantidad de agua a retirar

ΔH_a : Cantidad de agua que puede absorber el aire seco

Para determinar el flujo de aire V_3 que el ventilador debe manejar para llevar a cabo la deshidratación, teniendo en cuenta el mayor valor de volumen específico (V) que la masa de aire puede ocupar, haciendo uso de la ecuación 6:

$$V_3 = \dot{m}_1 * V \text{ (m}^3 \text{ / Kg as)} \quad \text{Ecuación 6}$$

En el balance de masa para el calentador y la cámara de deshidratación, se debe tener en cuenta las propiedades del punto de mezcla, en el cual se observa que $H_{a2} = H_{a5} = H_{a6}$.

Partiendo desde el punto de mezcla se presentan las siguientes ecuaciones:

$$m_1 H_{a1} + m_6 H_{a6} = m_3 H_{a3} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$m_3 = m_1 + m_6 \quad \text{Ecuación 8}$$

Antes de solucionar el balance se debe determinar el porcentaje de aire húmedo a recircular al sistema. Se recomienda que al inicio del proceso esta recirculación sea mínima ya que contiene un alto porcentaje de humedad, debido a la evaporación del agua no ligada presente en el producto a deshidratar. En el balance planteado en la ecuación 7, para hallar la humedad absoluta del aire:

$$H_{a3} = \frac{m_1 H_{a1} + m_6 H_{a6}}{m_3}$$

Una vez obtenida la humedad absoluta en el punto de mezcla entre el aire húmedo y el aire fresco, es necesario comprobar que no presente saturación. Para ello, se calculó la temperatura que alcanza la mezcla planteando una ecuación de igualdad entre los calores transferidos por la corriente 6 y la corriente 1, como se muestra en la ecuación 9:

$$m_1 C_{s1} (T_{eq} - T_0) \text{ } ^\circ\text{C} = m_6 C_{s6} (T_0 - T_{eq}) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

C_{s1} y C_{s6} : Calor húmedo de la corriente 1 y 6

T_{eq} : Temperatura de equilibrio entre Corrientes 1 y 6

Las capacidades caloríficas del aire y el vapor de agua se pueden suponer constantes en el intervalo normal de temperaturas e iguales a 1.005 KJ/Kg aire seco* °C y 1.884 KJ/Kg de vapor de agua* °C, respectivamente (Geankoplis, 1998).

$$C_s = 1.005 + 1.884 Ha \text{ (KJ/Kg as}^* \text{ } ^\circ\text{C)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

C_s : Calor húmedo

Ha : Humedad absoluta

Con esto se halla el valor de los calores húmedos correspondientes.

Sustituyendo todo en la ecuación 9 obtiene el valor de la temperatura de equilibrio

4.3.2 Balance de energía

La transferencia de energía calórica al producto se realiza mediante aire caliente que es impulsado entre las bandejas por los ventiladores, el aire de entrada al calentador ya no está a temperatura ambiente, sino que ya se encuentra a la temperatura de equilibrio del

punto de mezcla que es mayor a la ambiental, debido a la recirculación. (Heldmann & Singh, 1997).

La cantidad de energía necesaria se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * \Delta T + m_{H_2O} * \Delta H_{vap_{H_2O}} + m_{fruta} * C_{p_{fruta}} * \Delta T \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

Q : Energía total que le entrega al aire en KJ

m_{H_2O} : Masa de agua a evaporar

$C_{p_{H_2O}}$: Capacidad calórica del agua

ΔT : Diferencial de temperaturas de entrada y salida del equipo

$\Delta H_{vap_{H_2O}}$: Entalpia de vaporización del agua

m_{fruta} : Masa del durazno

$C_{p_{fruta}}$: Capacidad calórica del durazno

Para el diseño del equipo se necesita conocer el calor específico de los alimentos, una forma de calcularlos es por medio del uso de ecuaciones predictivas. En este caso se hizo uso de la ecuación propuesta por Heldamn y Singh (1981), la cual esta descrita por la siguiente expresión basada en los componentes de un producto alimentario (R. P. Singh et al., 1997):

$$C_{p_{fruta}} = 1,424X_C + 1,549X_P + 1,675X_F + 0,837X_A + 4,187X_W \quad (KJ/Kg^{\circ}C) \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

X : Es la fracción másica y los subíndices del miembro de la derecha son: C , carbohidratos;

P , proteínas; F , grasa; A , cenizas; y W , agua.

4.4 CALCULOS HIDRAULICOS.

Teniendo en cuenta que el proceso se lleva a cabo por medio de convección forzada, se parte desde el número de Nusselt el cual permite hallar el valor del coeficiente de convección determinado por medio de la ecuación 2 para una tubería circular:

Con el fin de resolver la ecuación 2 se debe hallar el número de Nusselt para despejar el coeficiente de convección de la ecuación, pero antes de eso se debe determinar si el número de Reynolds para conocer si el fluido es laminar o turbulento y el número de Prandtl con las ecuaciones 13 y 14.

$$Re = \frac{D \cdot \vartheta \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

Re : Número de Reynolds

D : Diámetro interno de la tubería

ϑ : Velocidad del flujo de aire

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica

Se calcula el número de Prandtl con la siguiente ecuación:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

Pr : Número de Prandtl

C_p : Capacidad calorífica

K : Velocidad de difusión de calor

La ecuación de Nusselt a utilizar es

$$Nu = 0,026 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \dots \dots \text{Ecuación 15}$$

5 CONTROL DEL DESHIDRATADOR

Para llevar a cabo el proceso de deshidratación fue necesario utilizar una serie de componentes electrónicos los cuales ayudaron a medir, visualizar y a mantener las diferentes variables para hacer más eficiente el proceso, a continuación, se definió el método empleado para hallar la función de transferencia y cada uno de los componentes que se le fueron empleados al equipo.

5.1 MÉTODO ZIEGLER-NICHOLS

Los controladores PID son ampliamente usados en los sistemas de control industrial.

Se aplican a la mayoría de los sistemas de control, pero se aprecia más su utilidad cuando el modelo de la planta a controlar no se conoce y los métodos analíticos no pueden ser empleados.

El controlador PID recibe una señal de entrada (generalmente es el error $e(t)$) y proporciona una salida (acción de control, $u(t)$)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Entonces, la función de transferencia del controlador PID es

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

Donde k_p es la ganancia proporcional, t_i el tiempo integral y t_d es el tiempo derivativo. El esquema habitual de uso del controlador PID es:

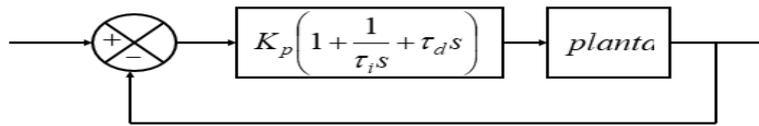


Figura 5: Control PID de una planta.
Autores

En la figura 5 se observa un control de PID que Ziegler y Nichols le propusieron una serie de reglas para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental. Definieron dos métodos.

5.1.1 Primer método

Se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “ese”, puede obtenerse los parámetros del controlador PID utilizando el primer método. En la figura 6 se observa la respuesta en forma de s.

Esta respuesta se caracteriza con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T . Y se puede aproximar por un sistema de primer orden con atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$$

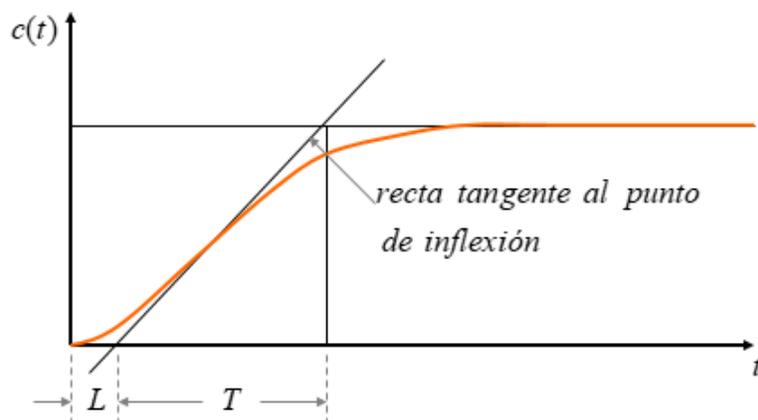


Figura 6. Curva experimental en forma de “ese”
Autores

Para obtener L y T, se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta, la intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias L y T.

Con L y T, se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la tabla 4.

Tabla 4. Valores de sintonización, método uno.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	A	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0,5L

Fuente: Autores

5.1.2 Segundo método

Se utiliza para sistemas que pueden tener oscilaciones sostenidas como se muestran en la figura 7. Primero se eliminan los efectos de la parte integral y derivativa. Después, utilizando solo la ganancia K_p , se hace que el sistema tenga oscilaciones sostenidas. El valor de ganancia con que se logre esto se llama ganancia crítica K_{cr} , que corresponde a un periodo crítico P_{cr} .

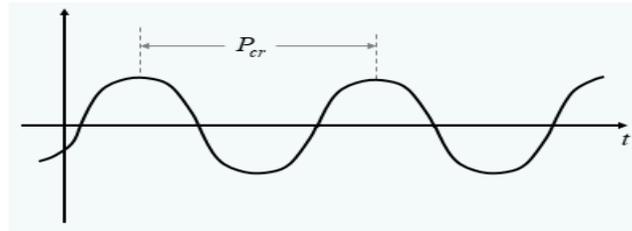


Figura 7. Oscilación sostenida.
Autores

Con los valores de K_{cr} y P_{cr} se calculan los valores de los parámetros del controlador PID, utilizando la tabla 5.

Tabla 5 Valores de sintonización, método dos.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$0,5 K_{cr}$	A	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Fuente: Autores

5.2 COMPONENTES

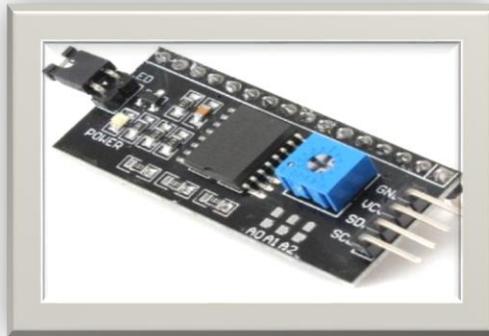
Lcd 16x2



Esta pantalla se utilizó para visualizar las variables de peso, humedad de entrada, temperatura de entrada, humedad de salida, temperatura de salida. Están ubicadas en la parte frontal superior izquierda del deshidratador en la primera LCD se muestra las medidas de temperaturas y humedades y en la segunda visualizamos el peso que va perdiendo la fruta durante el proceso.

Esta pantalla está enlazada al micro controlador Arduino por medio del protocolo de comunicación I2C, el micro controlador lee las variables de los diferentes sensores y las envía por el SDA el cual es la vía de comunicación entre él y las LCD's.

Módulo I2C



El módulo I2C facilito la comunicación entre las LCD's y el Arduino además de su programación, también evito el cableado ya que solo se necesitan 4 cables (GND, VCC, SDA, SCL); pero su mayor beneficio es que se puede cambiar su dirección de comunicación lo cual hace posible utilizar diferentes LCD y no tener problemas al enviar los datos.

Modulo PID



El REX-C100 cuenta con un control de temperatura PID, es decir control Proporcional Integral y Derivativo, lo que significa que el control hará cálculos matemáticos para controlar la temperatura, de tal forma que conforme pase el tiempo el control será más preciso haciendo que el error disminuya.

Su gran ventaja de uso es su fácil manejo para programar las constantes del controlador y su gran efectividad a la hora de mantener similares el valor medido con el valor deseado, como en el proceso de deshidratación la mayoría de las frutas se trabaja a temperaturas menores a 80°C este módulo nos brinda bastante seguridad ya que su rango de temperatura es de 0 a 400°C.

Sus salidas son con relé lo cual pareciera que hiciera un control on/off, pero en realidad lo que hace es que se anticipa y swichea antes de llegar al set point lo cual garantiza que no oscile el control, aunque esto depende en gran parte de las constantes que se le suministraron al módulo.

Boton de paro



Este nos permite detener el proceso de forma rápida en caso de alguna emergencia se encuentra ubicado en la parte frontal izquierda, su forma y color está diseñado para facilidad de maniobra a la hora de querer para el proceso de forma rápida pues su conexión es en serie con la línea de alimentación lo cual para el equipo de inmediato

Luz piloto.



Este componente ofrece de manera visual si la resistencia calefactora se encuentra encendida o apagada según sea el caso. Se tienen dos luces piloto luz verde para indicar que la resistencia está encendida y luz roja para indicar que la resistencia está apagada. Además se aprovecha sus pulsadores para arrancar y detener el proceso de deshidratación pues los pulsadores están conectados a dos pines de interrupciones del Arduino los cuales son programados para el arranque y paro del proceso, verde y rojo respectivamente.

Regulator Dimmer



El regulador dimmer facilita de forma manual calibrar las revoluciones del ventilador para que ofrezca cierta cantidad de aire necesaria que pase por el ducto de calefacción. Este regulador cuenta con cuatro borneras las cuales las dos primeras son su entrada de 110v y su salida regulable para la alimentación del ventilador

Interruptor.



Este es el switch que se utiliza para apagado y encendido del equipo pues su conexión es igual al del botón de paro, es decir, en serie la línea de alimentación del deshidratador.

Relé de estado sólido



Debido a que la resistencia calefactora consume un alto rango de corriente y no se puede conectar directamente a la salida del módulo PID debido a que este utiliza un relé de 10 A para sus salidas y lo quemaría, se debió utilizar un relé de estado sólido de 40 A para garantizar el buen funcionamiento del mismo y la resistencia calefactora. Su alimentación de 12 v dc facilita las cosas para el módulo PID además de su forma de conmutación hace que el proceso pueda operar por mayor tiempo.

Balanza digital



Este instrumento permite medir variables de peso hasta un valor de 5kg. Teniendo en cuenta que la cantidad de fruta a deshidratar no supera los 500 gr está en un rango suficiente para su uso.

Sensor de humedad



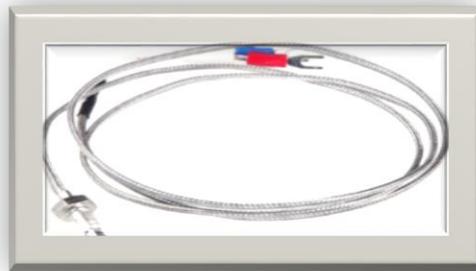
El dht2 ofrece mediciones de buena precisión y exactitud pues tiene un buen rango de operación que va desde 0 hasta 120°C, este se utilizó para medir la humedad de entrada de la cámara como a la salida y así poder observar la pérdida de agua en la fruta durante el proceso. Además, su programación en id del Arduino ya que tiene incluida las librerías para su fácil manejo y calibración.

Sensor de temperatura



En esta parte del proceso para observar la temperatura de entrada y de salida se utilizó un ntc de 10 k por su gran rango de operación ya que puede llegar a medir hasta 400°C con gran precisión y exactitud, además de su gran facilidad a la hora de en lazar con el microcontrolador Arduino pues dispone de varias librerías para la interpretación de lectura de los datos.

Termocupla tipo k



Se utilizó por su gran rango de medición pues va de los 0 hasta los 1300°C y su facilidad de conectar al módulo PID pues consta de dos terminales (+ -), además de su fácil forma de enlazar con el modulo hace más sencillo y eficaz el proceso.

Ventilador



Este componente se utilizó en dos procesos diferentes por lo tanto se emplearon dos ventiladores de 110v, la primera es transferir el calor que produce la resistencia calefactora del ducto a la cámara de secado, la conexión con el regulador dimer facilita la forma de operar y garantizar el de flujo de aire caliente requerido en el equipo de deshidratación. El segundo uso es de ventilación y disipación de calor en los siguientes componentes, LCD, módulo PID, relé estado sólido, Arduino uno, reguladores de voltaje, fuente de alimentación, módulo microSD y a si mantener optimo su temperatura de operación y evitar daños por calentamiento en los mismos.

MicroSD



Este módulo ahorra una gran cantidad de tiempo y precisión a la hora de obtener la data del proceso, pues su fácil comunicación SPI con Arduino hace que guarde los datos en

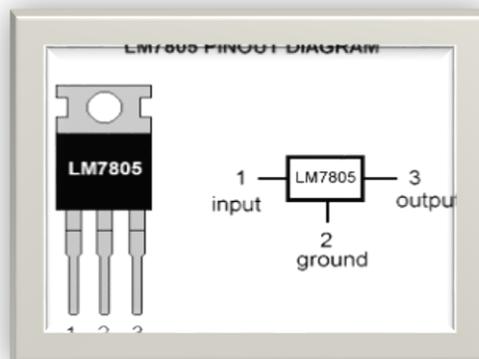
tiempo real y en cada cierto tiempo de forma precisa, guardara los datos de forma ordenada y se diferencian las humedades y temperaturas al igual que el peso para facilitar la obtención de la curva de secado.

Arduino uno



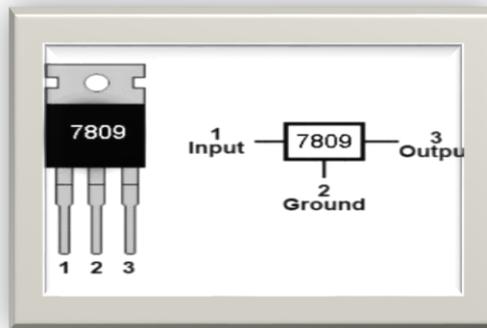
Este microcontrolador es quizás el más importante en el proceso, pues es el encargado de hacer comunicación maestro esclavo con los diferentes componentes, recoger los datos y transformarlos por medio de programación en forma legibles de interpretar.

Regulador de voltaje 7805



Este regulador garantiza que siempre se tenga cinco voltios a su salida y poder alimentar de forma segura los sensores de humedad, temperatura y los pulsadores que van a las interrupciones junto con el módulo microSD y las dos LCD.

Regulador de voltaje 7809



Es el encargado de regular los doce voltios que proporciona la fuente a nueve voltios para la alimentación del microcontrolador Arduino y proporcionarle la corriente óptima para su funcionamiento adecuado.

Fuente de voltaje



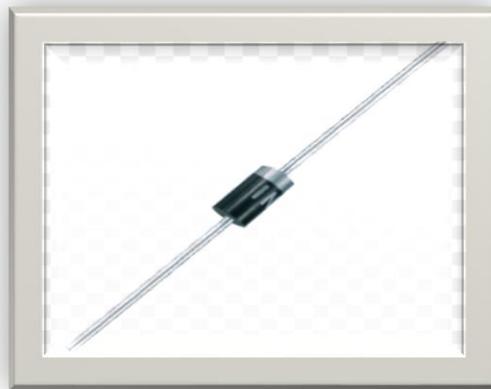
Es la encargada de convertir el voltaje como la corriente de alterna en directa a de más de reducirlo de 110v AC a 12 v DC.

Transistor 2n2222a



Este transistor bipolar NPN se utilizó como un conmutador, se le proporcionó un voltaje a la base para que conmute el emisor con el colector y así se pudo encender y apagar el led de las luces pilotos, según el estado en que se encontraba la resistencia calefactora.

Diodo 4004



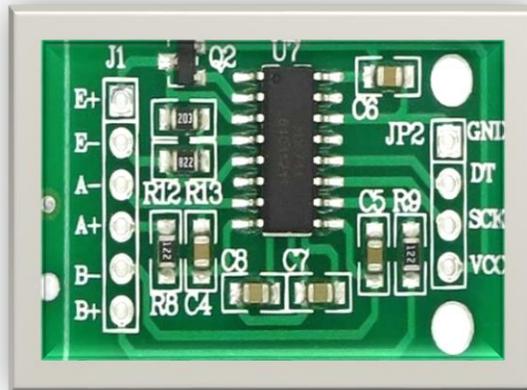
Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. se aprovecha esta funcionalidad para proteger el circuito y componentes de corrientes inversas como de mal conexión a la hora de alimentarlo.

Anemómetro



Es un aparato meteorológico utilizado para medir la velocidad del aire, necesario en el proceso de deshidratación.

Módulo hx711



Este módulo es una interface entre las celdas de carga y el microcontrolador, permitiendo poder leer el peso de manera sencilla. Internamente se encarga de la lectura del puente wheatstone formado por la celda de carga, convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits. Se comunica con el micro controlador mediante 2 pines (Clock y Data) de forma serial.

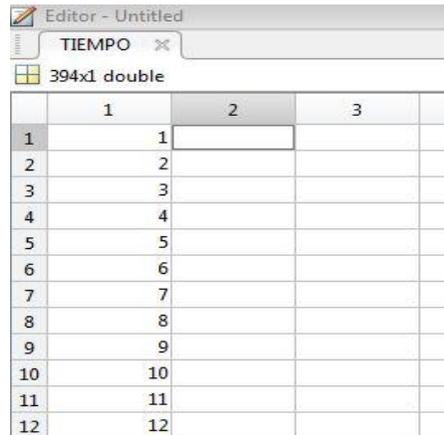
Celda de carga 5kg



El sensor de presión o celda de carga YZC-133, se usa en combinación de convertidores AD como el HX711 para medir la masa de un objeto, es muy fácil de usar y en especial en el mundo de Arduino, además es totalmente sólido y no cuenta con partes móviles.

5.2 FUNCION DE TRANSFERENCIA EXPERIMENTAL

Inicialmente, se realizó en este proceso el ingreso de los datos de la caracterización que se le hizo a la planta en la hoja de cálculo, se seleccionó la columna de tiempo y se copia; seguidamente se ingresó a Matlab, después pegar y lo se guardó como tiempo esto quedara guardado en el Workspace. Se repitieron estos pasos con la variable de temperatura como lo muestra las figuras 8 y 9



	1	2	3
1	1		
2	2		
3	3		
4	4		
5	5		
6	6		
7	7		
8	8		
9	9		
10	10		
11	11		
12	12		

Figura 8: datos de entrada tiempo
Autores



	1	2
1	20.5000	
2	20.6800	
3	20.5000	
4	20.5900	
5	20.5000	
6	20.5900	
7	20.5900	
8	20.7700	
9	20.5900	
10	20.6800	
11	20.8500	
12	20.7700	

Figura 9: datos de salida temperatura
Autores

El segundo paso que se realizó fue la exportación de los datos del Workspace a la herramienta de Matlab y se especificaron las variables de entrada como la de salida como se muestra en la figura 10. Se tuvo en cuenta que el tiempo de muestreo debe ser bastante pequeño para obtener un mejor comportamiento de la planta, como se observa en la figura 11

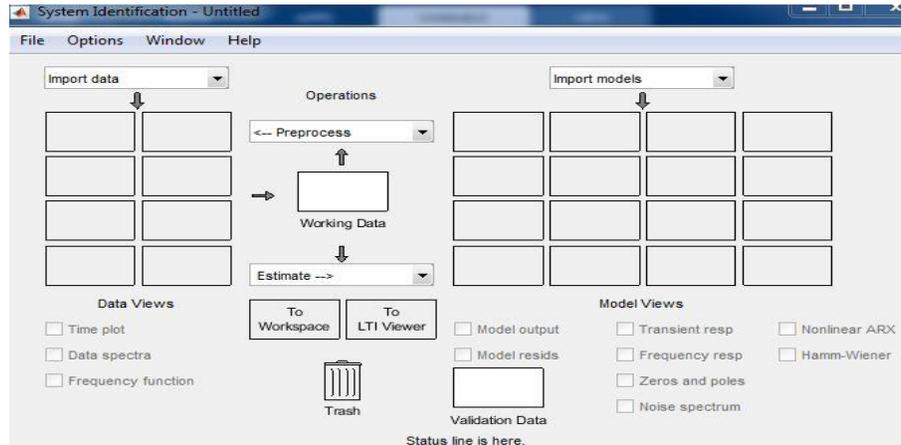


Figura 10: ident matlab
Autores

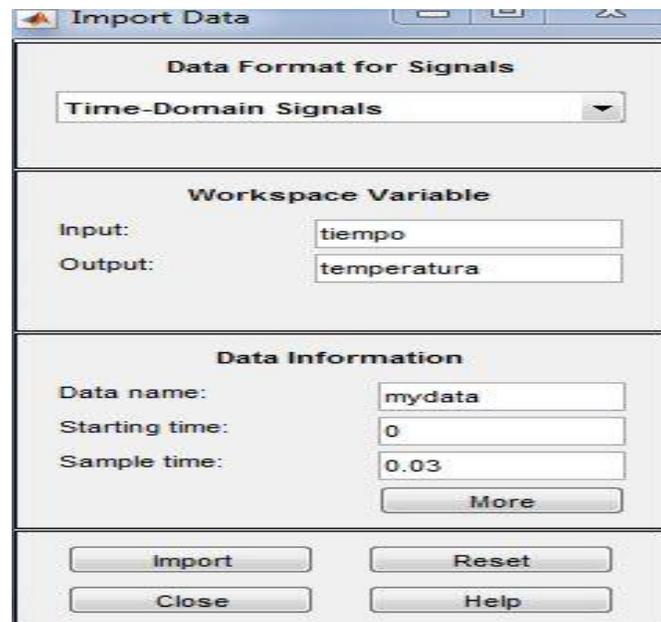


Figura 11: configuraciones variables de entrada y salida en ident
Autores

Como tercer paso que se realizó fue importar e implementar la data en “working data” como se presenta en la figura 12, después de esto se cambió la opción de “estimate” a “transfer function models” como se observa en la figura 13 para configurar los polos y zeros

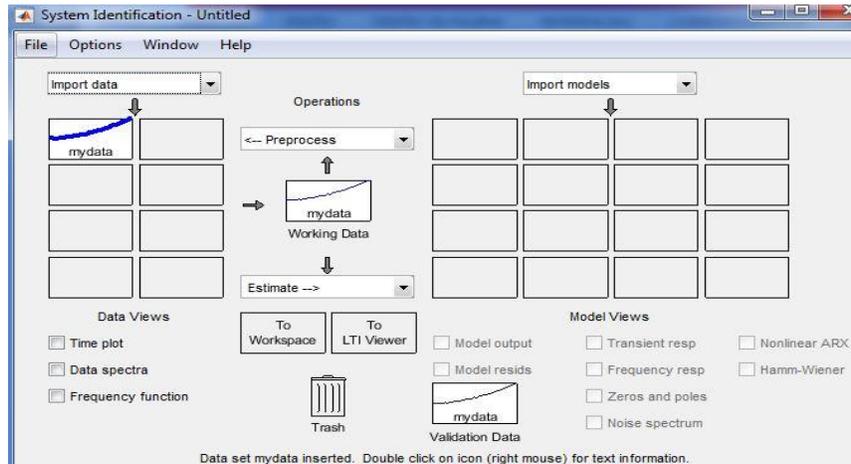


Figura 12: configuración ident
Autores

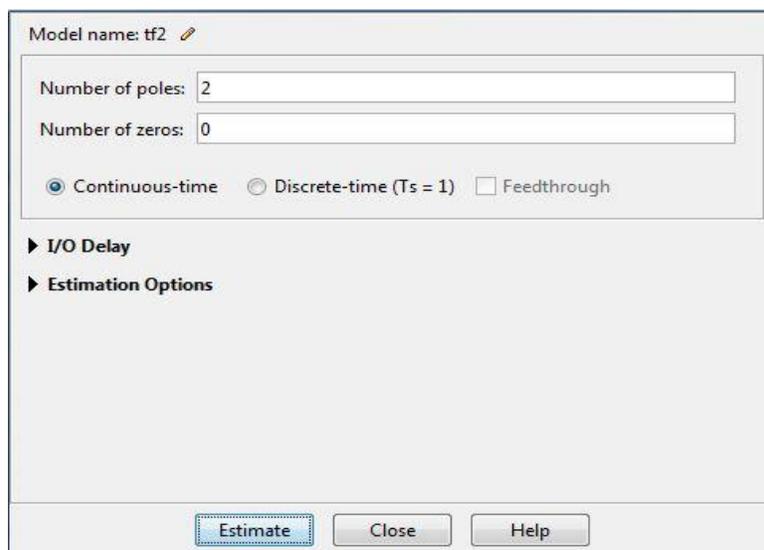


Figura 13: configuración polos y zeros en ident
Autores

Al estimar se presenta el comportamiento de la figura 14 y se puedes llevar la función de transferencia al Workspace como se observa en la figura 15.

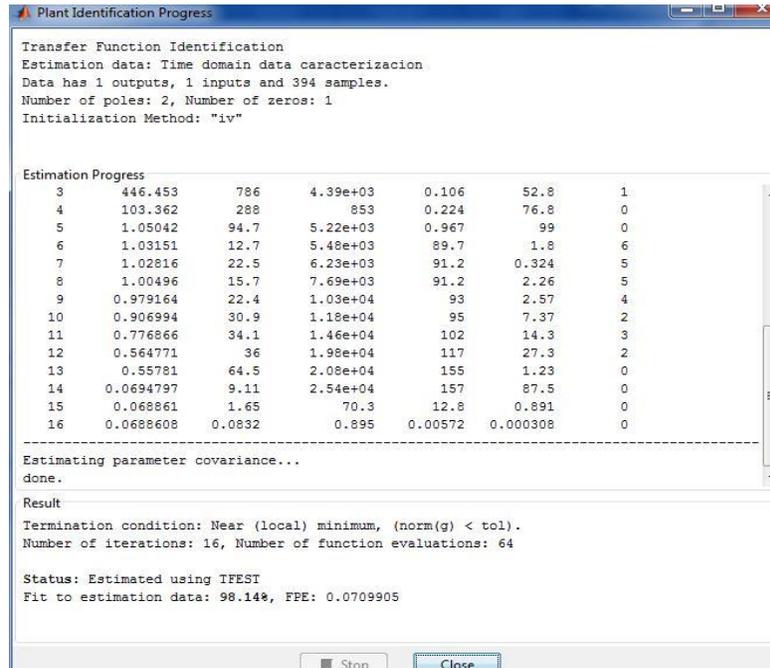


Figura 14: Estimación función de transferencia
 Autores

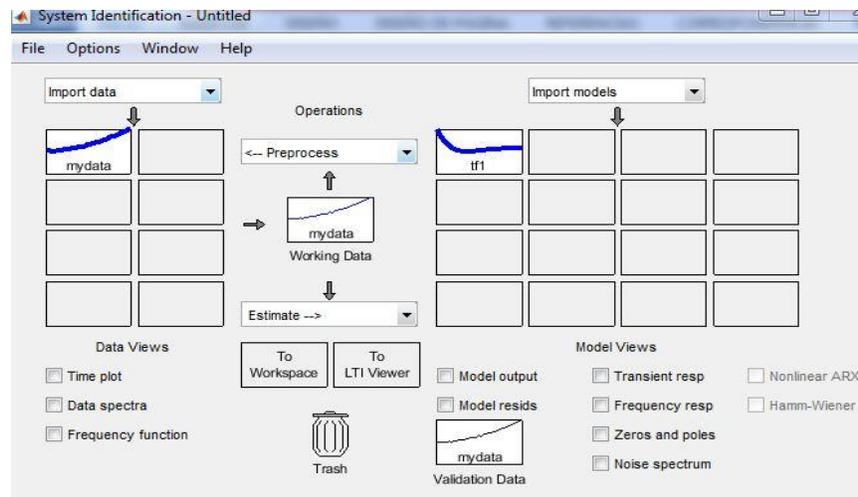


Figura 15: función de transferencia ident
 Autores

Al tener la función en "Workspace" se citó al "command window" de Matlab donde se visualizó nuestra función de transferencia figura 16 la cual dio de segundo orden, también

se pudo graficar nuestra función aplicándole un escalón unitario o en nuestro caso un escalón del “set point” de la planta figura 17

```

Command Window
>> tf1

tf1 =

From input "u1" to output "y1":
    0.4014 s + 0.04405
-----
    s^2 + 0.894 s + 0.4162

Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 2   Number of zeros: 1
Number of free coefficients: 4
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 98.14% (stability enforced)
FPE: 0.07099, MSE: 0.06886
fx >> |

```

Figura 16: función de transferencia command window
Autores

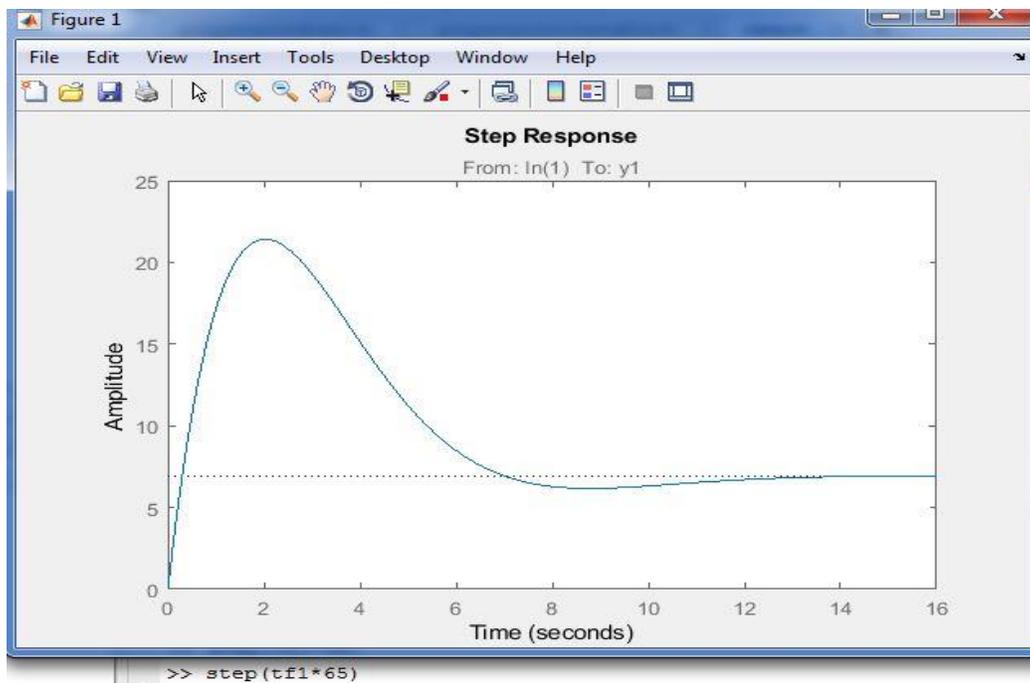


Figura 17: función de transferencia graficada “command window”
Autores

Ya con la función de transferencia se fue a la herramienta “Simulink” y se multiplico con un “step” de valor del “set point” de la planta “65” en lazo abierto figura 18 y por medio de un “scope” se pudo ver el comportamiento de la planta sin control figura 19.

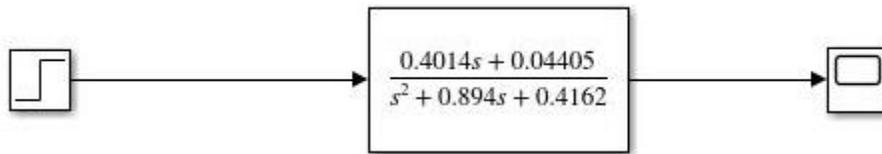


Figura 18: planta en lazo abierto
Autores

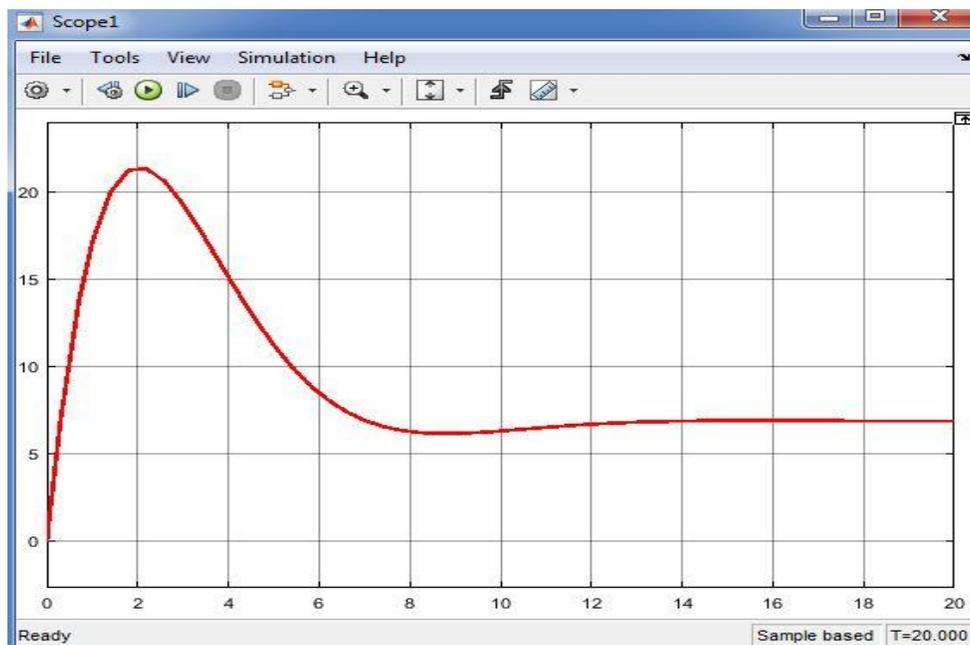


Figura 19: planta en lazo abierto set point 65
Autores

Como se observa en la figura 20 el comportamiento de la planta en las dos herramientas de Matlab se da de la misma manera, ya que se aplicó el mismo “set point”; se observó que el tiempo de subida, el tiempo de asentamiento, tiempo de amortiguamiento son iguales.

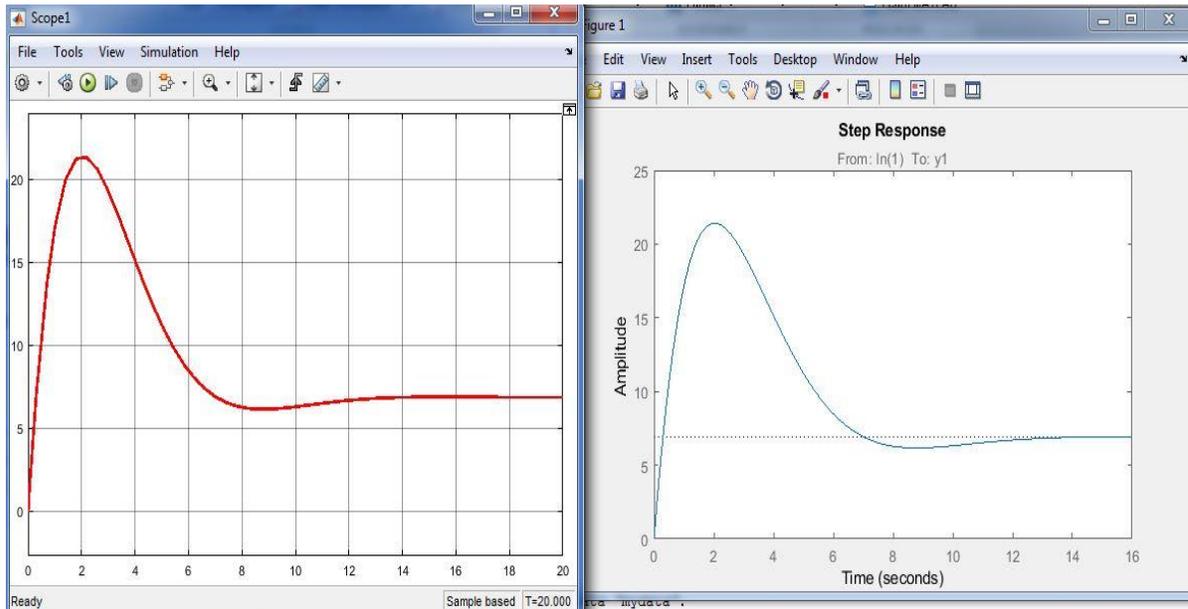


Figura 20: grafica en “Simulink” y “Command window”
Autores

Se analizó las reglas y los métodos propuestos por Ziegler-Nichols, al tener la gráfica en forma de S figura 21 se aplicó el primer método lo cual consiste en caracterizar con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T . Además, se puede aproximar con un sistema de primer orden y atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$$

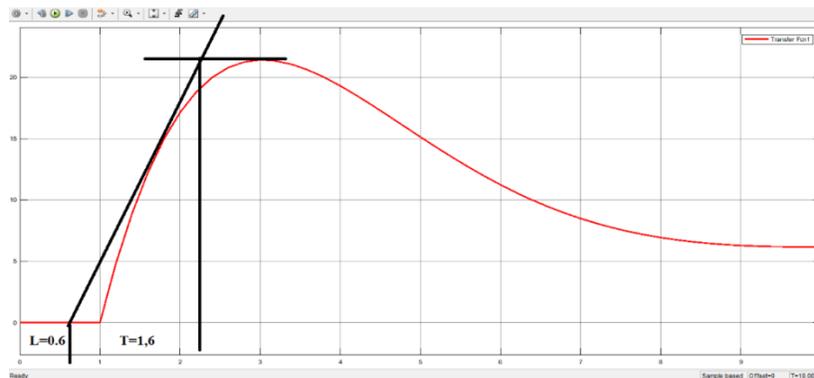


Figura 21: primer método Ziegler-Nichols
Autores

Tabla 6: Valores de sintonización, método uno.

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: Autores

$$L=0.6$$

$$T=1.6$$

Controlador P

$$P = \frac{T}{L}$$

$$P = \frac{1.6}{0.6} = 2.666666667$$

Controlador PI

$$P = 0.9\frac{T}{L}$$

$$P = 0.9\frac{1.6}{0.6} = 2.4$$

$$I = \frac{kp}{Ti}$$

$$I = \frac{2.4}{\frac{0.6}{0.3}} = 1.2$$

Controlador PID

$$P = kp$$

$$P = 1.2 \frac{1.6}{0.6} = 3.2$$

$$I = \frac{k_p}{T_i}$$

$$I = \frac{3.2}{2(0.6)} = 2.666666667$$

$$D = k_p T_d$$

$$D = (3.2)(0.5)(0.6) = 0.96$$

Tabla 7: Valores de las constantes de los diferentes controles

Constantes	P	I	D
P	2.666666667	∞	0
PI	2.4	1.2	0
PID	3.2	2.666666667	0.96

Fuente: Autores

Controlador proporcional

Al controlador que se calculó, se puede apreciar en la figura 22 y 23, pero se pudo observar que este controlador proporcional no se le pudo aplicar en la planta real como se visualiza en la figura 24.

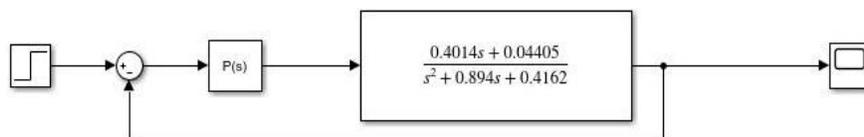


Figura 22: diagrama retroalimentado control P
Autores

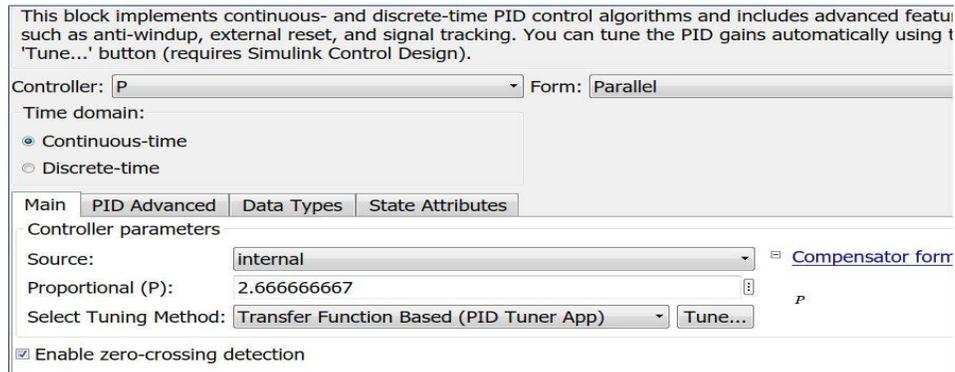


Figura 23: configuración de la constante P.
Autores

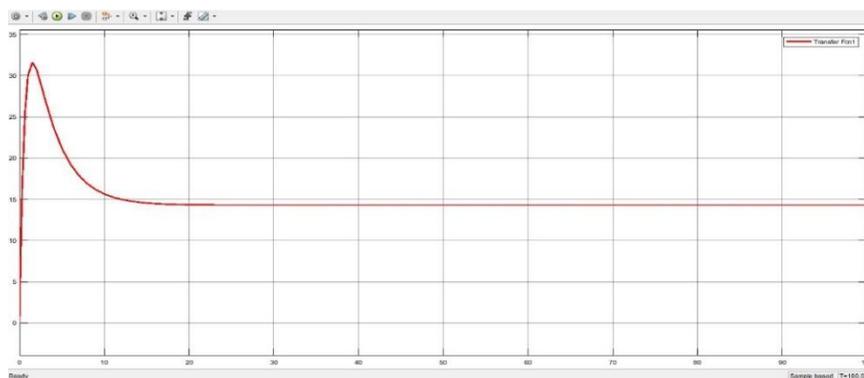


Figura 24: comportamiento grafica control P
Autores

Controlador proporcional-integral

Este controlador que se calculó por el método uno de ziegler-Nichols como se puede apreciar en la figura 25 y 26, se pudo observar que este controlador proporcional-integral con retroalimentación dio una buena respuesta pero al igual no es el indicado para el deshidratador esto se puede visualizar en la figura 27

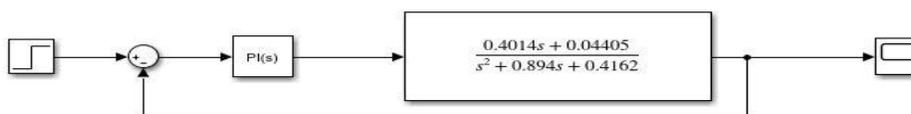


Figura 25: diagrama retroalimentado control PI
Autores

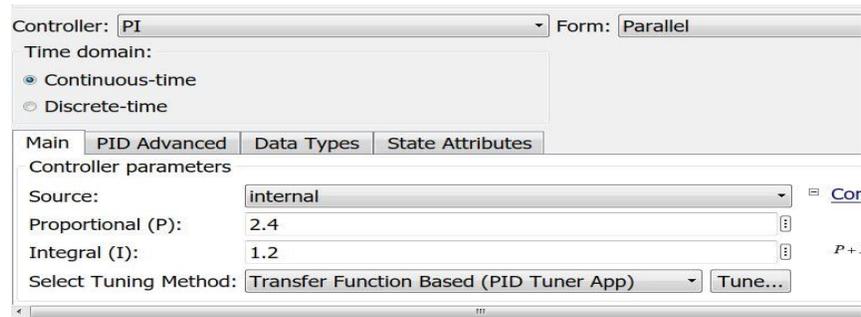


Figura 26: Configuración de las constantes PI.
Autores

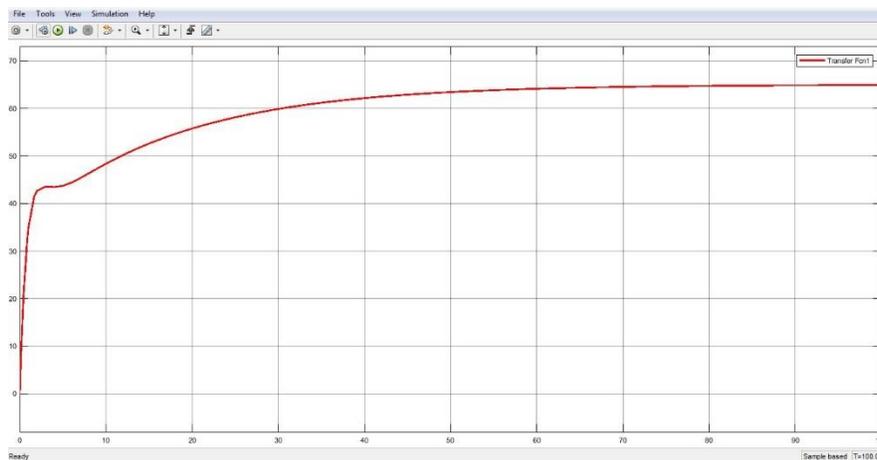


Figura 27: Comportamiento grafica control PI
Autores

Controlador proporcional-integral-derivativo

El controlador que valoramos por el método uno de ziegler-Nichols se le asignó a la función de transferencia como se puede visualizar en la figura 28 y 29, se pudo notar que este controlador proporcional-integral-derivativo con retroalimentación arrojó una muy buena respuesta debido a que se obtuvo el “step” que se aplicó; alcanzó estabilizarse más que con el control PI pues este se dilató a 55 segundos y con el control PID solo se tardó 38 segundos, esto se puede observar en la figura 30

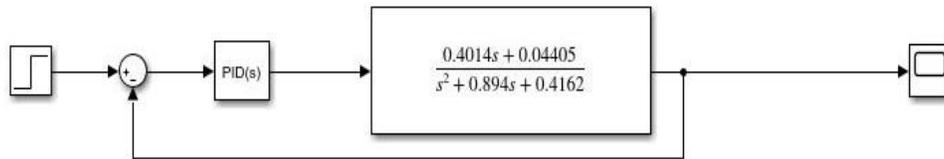


Figura 28: Diagrama retroalimentado control PID
Autores

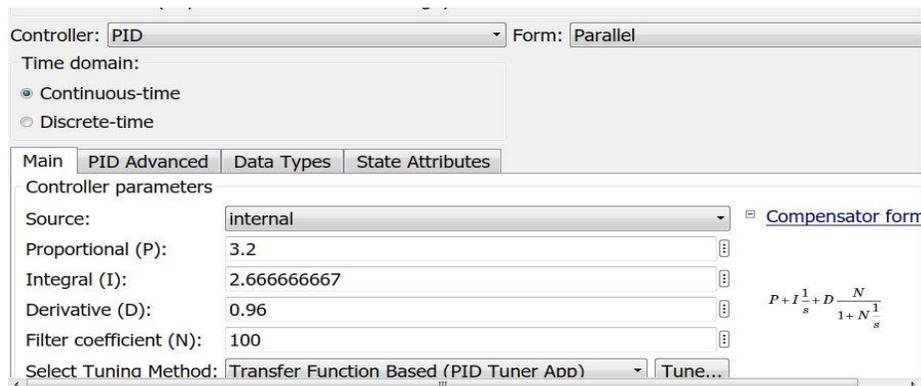


Figura 29: Configuración de las constantes PID.
Autores

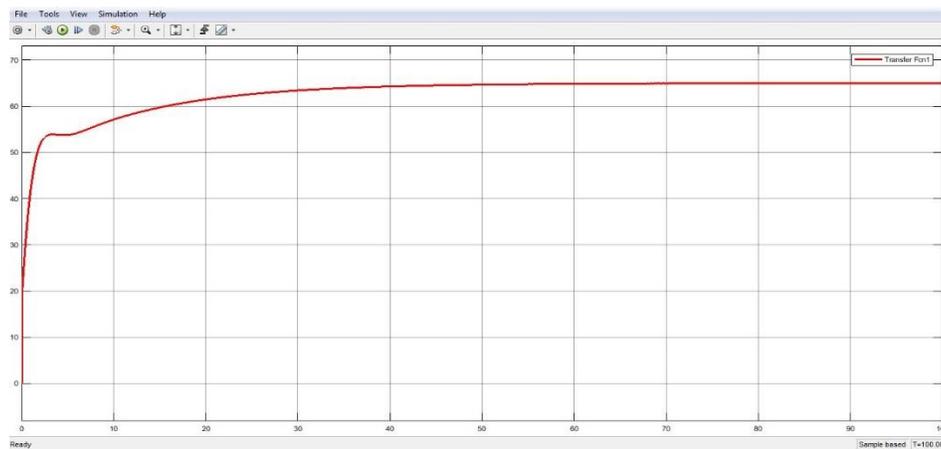


Figura 30: Comportamiento grafica control PID
Autores

6. COSTO DEL CONTROL EMPLEADO AL DESHIDRATADOR

A continuación, se describe detalladamente los costos del control empleado al deshidratador de bandejas S-001 de la Universidad de Pamplona

Tabla 8: costos del control

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Módulo PID	1	\$ 95.000,00	\$ 95.000,00
Relé estado sólido	1	\$ 35.000,00	\$ 35.000,00
Luz piloto	2	\$ 8.500,00	\$ 17.000,00
Módulo I2C	2	\$ 13.000,00	\$ 26.000,00
Dht22	2	\$ 19.000,00	\$ 38.000,00
Termocupla tipo k	1	\$ 12.000,00	\$ 12.000,00
Micro SD	1	\$ 16.000,00	\$ 16.000,00
Arduino uno	1	\$ 26.000,00	\$ 26.000,00
Reguladores de voltaje	10	\$ 1.500,00	\$ 15.000,00
Fuente 12v	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
Transistor NPN 2N2222A	4	\$ 400,00	\$ 1.600,00
Diodo 4004	2	\$ 300,00	\$ 600,00
Módulo Conversor Analógico/Digital de 24 Bits HX711	10	\$ 4.000,00	\$ 40.000,00
Cable encauchado	10	\$ 4.000,00	\$ 40.000,00
Etiquetadora	1	\$ 155.000,00	\$ 155.000,00
Baquela	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Bombillo	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Roseta	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Regleta conexión	10	\$ 1.500,00	\$ 15.000,00
Cinta Flex	10	\$ 1.000,00	\$ 10.000,00
Regleta hembra	4	\$ 1.500,00	\$ 6.000,00
Regleta macho	4	\$ 1.500,00	\$ 6.000,00
Estaño	3	\$ 1.000,00	\$ 3.000,00
borneras	4	\$ 1.200,00	\$ 4.800,00
Soporte peso	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
Soporte micro SD	1	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
Canaleta	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
Conector XH2.54 8P Macho	4	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
Conector XH2.54 8P hembra	4	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
capacitores	5	\$ 500,00	\$ 2.500,00
		TOTAL	\$ 648.500,00

Fuente: Autores

7. ANALISIS DE RESULTADOS.

7.1 ALTERNATIVAS DE CONTROL

7.1.1 Alternativa 1

Se propone aplicar un controlador proporcional (P) al deshidratador de bandejas, los controladores que solo son proporcionales tienen la ventaja que cuentan con un parámetro de ajuste, pero a su vez tiene una gran desventaja los cuales operan con una desviación en la variable que se controla. El controlador proporcional disminuye la potencia media suministrada al calentador cuando la temperatura se aproxima a ser la adecuada. Esto tiene el efecto de disminuir la energía del calentador, mantenimiento la temperatura estable. (Smith et al, 1991).

7.1.2 Alternativa 2

Se propone aplicar un controlador proporcional-integral (PI) al deshidratador de bandejas, la mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminarla. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (PI). Los controladores proporcionales-integrales tienen dos parámetros de ajuste: la banda proporcional y el tiempo de reajuste; la ventaja de este controlador es que la acción de integración o de reajuste elimina la desviación. (Smith et al, 1991).

7.1.3 Alternativa 3

Se propone la aplicación de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) al deshidratador de bandejas, algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este nuevo modo de control es: la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o pre-actuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez. Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas, los controladores PID tienen tres parámetros de ajuste: banda proporcional, el tiempo de reajuste y la rapidez derivativa. La rapidez derivativa se da siempre en minutos, la ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de ver hacia dónde se dirige el proceso (Smith et al, 1991).

7.2 ALTERNATIVA DE CONTROL SELECCIONADA CON EL METODO

ELECTRE

Con el propósito de analizar las alternativas propuestas se seleccionan factores relevantes de comparación entre las alternativas seleccionadas, estos se denominan criterios y ponderaciones los cuales se muestran a continuación en la tabla 9

Tabla 9. Ponderación del vector peso

Criterios	Ponderación (%)
Eficiencia operacional (F1)	5
Disminución del tiempo operacional (F2)	4
Consumo de energía (F3)	2
Adaptabilidad al proceso (F4)	3

Fuente: Autores

Estos criterios fueron seleccionados por la importancia que tienen en el diseño del sistema de control de temperatura en el deshidratador de bandeja. Se elaboró la matriz de análisis

de importancia, donde se da una ponderación a cada alternativa dependiendo del factor, ver tabla 10.

Tabla 10: Análisis de importancia.

Alternativas	Criterios			
	F1	F2	F3	F4
1	15	9	6	10
2	10	5	7	8
3	22	12	1	14

Fuente: Autores

Siguiendo los parámetros del método se elabora la matriz de concordancia y discordancia, como se aprecia en las tablas 11 y 12

Tabla 11: Matriz de concordancia

Alternativas	1	2	3
1	-	0,7857	0,2143
2	0,2143	-	0,2143
3	0,7857	0,7857	-

Fuente: Autores

Tabla 12: Matriz de discordancia

Alternativas	1	2	3
1	-	0,1667	0,6667
2	0,5714	-	1,0000
3	0,8333	1,0000	-

Fuente: Autores

Se compara las matrices de concordancia y discordancia por el criterio de dominancia para priorizar las alternativas y seleccionar la que más se ajusta a los requerimientos como se muestra en la tabla 13

Tabla 13: Priorización de alternativas según dominancia entre filas y columnas

Alternativas	Dominancia por filas	Dominancia por columnas	Diferencia	Jerarquía
1	ninguna	3	-3	3
2	ninguna	3	-3	2
3	1,2	ninguna	2	1

Fuente:Autores

Como se puede observar en la tabla 13 se encontró que la mejor alternativa para el sistema de control de temperatura en el deshidratador de bandejas es la número 3, ya que presenta una dominancia sobre las demás alternativas y criterios establecidos.

7.3 BALANCE DE MASA

Los cálculos iniciales que se deben realizar en el deshidratador son el balance de masa y energía, teniendo en cuentas las propiedades psicométricas del aire en la cual se realiza la operación, se optó por manejar una temperatura de deshidratación de 50 a 60°C para el durazno (Golisz, Jaros, & Kalicka, 2013), esta temperatura varía dependiendo de la fruta que se desee deshidratar.

Las ecuaciones empleadas fueron tomadas de trabajos anteriores (Patiño & Hernandez, 2018), en donde realizaron el diseño del deshidratador de bandejas.

El aire fresco ingresa al proceso con una temperatura ambiente de 18°C y humedad relativa de 86,7%, como se muestra en la figura 31 y es calentado hasta una temperatura de 60°C, con la cual entra a la cámara de deshidratación. Para realizar el balance de masa se asume una humedad relativa del 90% y una temperatura de bulbo húmedo TBh de 57,88 °C a la salida de la cámara.



Figura 31: Humedad relativa tomada con el hidrómetro

Introduciendo en el software los datos CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo, se obtienen los resultados de las propiedades termodinámicas del aire en la entrada y salida de la cámara de deshidratación, como se ilustran en las tablas 14 y 15

Tabla 14. Propiedades del aire a la entrada, T_B s: 18 °C; %HR: 86,9%.

Propiedades	Valores
DB (°C)	18,00000000
RH (%)	86,00000000
WB (°C)	16,47724375
W (g H₂O/ Kg aire seco)	11,13699283
h (KJ/ Kg aire seco)	46,31714391
v (m³/ Kg aire seco)	0,83924087
AW (Kg/m³)	0,01327032
vp (Pa)	1782,38696137
dm (Kg aire humedo/m³)	1,20482334

Tabla 15: Propiedades del aire a la salida, *TBs*: 60; %*HR*: 90%.

Propiedades	Valores
DB (°C)	60,00000000
RH (%)	90.00000000
WB (°C)	57,88928072
W (g H₂O/ Kg aire seco)	134,84724090
h (KJ/ Kg aire seco)	412,22398017
v (m³/ Kg aire seco)	1,14724088
AW (Kg/m³)	0,11754048
vp (Pa)	18053,57043553
dm (Kg aire humedo/m³)	0,98919701

Fuente: CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo; modificado por autores

Especificaciones de las corrientes del proceso

Corriente 1: $T_{amb} = 18^{\circ}\text{C}$

$$\%HR = 86,9\%$$

$$Ha_1 = 0,01327032 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg Aire Seco}$$

Corriente 2: $T = 57,88^{\circ}\text{C}$

$$\%HR = 90\%$$

$$Ha_2 = 0,11754048 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg Aire Seco}$$

Corriente 3: $T = 57,88^{\circ}\text{C}$

Corriente 4: $T = 60^{\circ}\text{C}$

Corrientes 5 y 6: $T = 57,88^{\circ}\text{C}$

$$\%HR = 90\%$$

Corriente 7: masa = 200 g

$$T_{FRUTA} = 12^{\circ}C$$

$$X_7 = 86\%$$

Corriente 8: $T_{FRUTA} = 57,88^{\circ}C$

$$X_8 = 11\%$$

Se despeja m_8 de la ecuación 3 y se obtiene el siguiente resultado

$$m_8 = 0,2 \text{ kg} \frac{(1 - 0,86)}{(1 - 0,11)} = 0,03146067$$

Para calcular la cantidad de agua retirada utilizamos la ecuación 4

$$(0,2 * 0,86) - (0,03146067 * 0,11) = 0,168539 \text{ kg}$$

Tabla 16. Condiciones del aire de entrada y salida

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Humedad Absoluta (Kg H ₂ O/Kg Aire Seco)	Volumen Especifico (m ³ /Kg Aire Seco)
18	87,4	0,01327032	0,83924087
60	90	0,11754048	1,14724088

Fuente: Autores

Se restan las humedades absolutas mostradas en la tabla 16 para calcular la cantidad de agua que puede absorber el aire seco.

$$0,11754048 - 0,01342463 = 0,10427448 \text{ Kg de agua}$$

La cantidad de aire requerido se determina con la ecuación 5

$$m_1 = \frac{0,168539}{0,10427448} = 1,616301515 \text{ Kg de aire seco}$$

Determinamos el flujo del aire con la ecuación 6

$$V_3 = (1,616301515 \text{ Kg as}) * (1,14724088 \text{ m}^3 / \text{Kg as}) = 1,854287172 \text{ m}^3.$$

El porcentaje de recirculación utilizado es el 15 % porque tiene que ser lo mínimo posible según restricciones

$$m_6=0,15m_1=0,2428146147 \text{ Kg}$$

$$m_3=1,616301515+0,2428146147=1,85911613 \text{ Kg}$$

Con este dato se resolvió el balance planteado en la ecuación 7, para hallar la humedad absoluta del aire:

$$H_{a3}=\frac{(1,616301515)(0,01327032)+(0,2428146147)(0,11754048)}{(1,85911613)} = 0,02688879059 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Kg as}}$$

Con la ecuación 10 calculamos los calores húmedos correspondientes a C_{s1} y C_{s6}

$$C_{s1}= 1.005+1.884* (0,01327032)=1,030001283$$

$$C_{s6}= 1.005+1.884* (0,11754048)=1,226446264$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 9 hallamos el valor de la temperatura de equilibrio

$$(1,616301515) (1,030001283) (T_{eq}-10)= (0,2428146147) (1,226446264) (57,88-T_{eq})$$

$$T_{eq}=17,265 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7.4 BALANCE DE ENERGIA

Para solucionar la ecuación 12 utilizamos la información de la tabla 1 para el durazno

$$Cp_{fruta}=1,424(0,954) +1,549(0,0091)+1,675(0,0025) +0,837(0,0043)+4,187(0,86)$$

$$Cp_{fruta}= 4,9811985 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

Reemplazando la ecuación 11 se obtiene:

$$Q= (0,168539 \text{ Kg}) * (4,18435 \text{ KJ/Kg} * ^\circ\text{C}) * (60-18) ^\circ\text{C} + (0,168539 \text{ Kg}) * (2383,33 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}) + (0,031460677 \text{ Kg}) * (4,9811985 \text{ KJ/Kg} * ^\circ\text{C}) * (60-18) ^\circ\text{C}$$

$$Q= 437,8854526 \text{ KJ}$$

Para hallar la potencia requerida en el proceso en unidades de *KWh*, se realiza la siguiente conversión:

$$P=437,8854526 \text{ KJ} \left(\frac{1 \text{ KWh}}{3600000 \text{ KJ}} \right) = 0,00012163 \text{ KW}_h$$

7.5 CALULOS HIDRAULICOS

Calculamos el número de Reynolds con la ecuación 13

$$Re = \frac{(0,064\text{m}) * (4\text{m/s}) * (1,2124\text{Kg/m}^3)}{1,8158 \times 10^{-5} \text{Kg/m*s}} = 17092,9838$$

Con este valor se puede concluir que el flujo en la tubería del equipo de deshidratación es turbulento porque es un *Re* mayor a 10000. Posteriormente se calcula el número de Prandtl con la ecuación 14

$$Pr = \frac{(1007 \text{ J/Kg*K}) * (1,8158 \times 10^{-5} \text{ Kg/m*s})}{0,024988 \text{ J/s*m*K}} = 0,731755$$

El número de Nusselt se calcula con la ecuación 15

$$Nu = (0,026) * (17092,9838)^{0,8} * (0,731755)^{1/3} = 18,0788$$

Despejando el coeficiente de convección de la ecuación 2 y sustituyendo los valores se obtiene:

$$h = \frac{18,0788 * 0,024988}{0,077} = 5,866922$$

7.6 CURVAS DE SECADO

La primera prueba se realizó con las siguientes condiciones de operación

Velocidad de aire= 4m/s

Temperatura de la cámara=60 °C

Humedad relativa del ambiente=57%

Recirculación=85%

Espaciado entre bandejas=5 cm

Espesor de la fruta=5 mm sin tratamiento

Se procede a realizar las curvas de secado del durazno en base húmeda (figura 32), de 0 a 60 minutos se encuentra el periodo de calentamiento, de 60 a 180 minutos se observa el periodo de velocidad constante y de 180 a 240 minutos se observa el periodo de velocidad decreciente; estos tres periodos se observan en una curva de secado típica de un sólido.

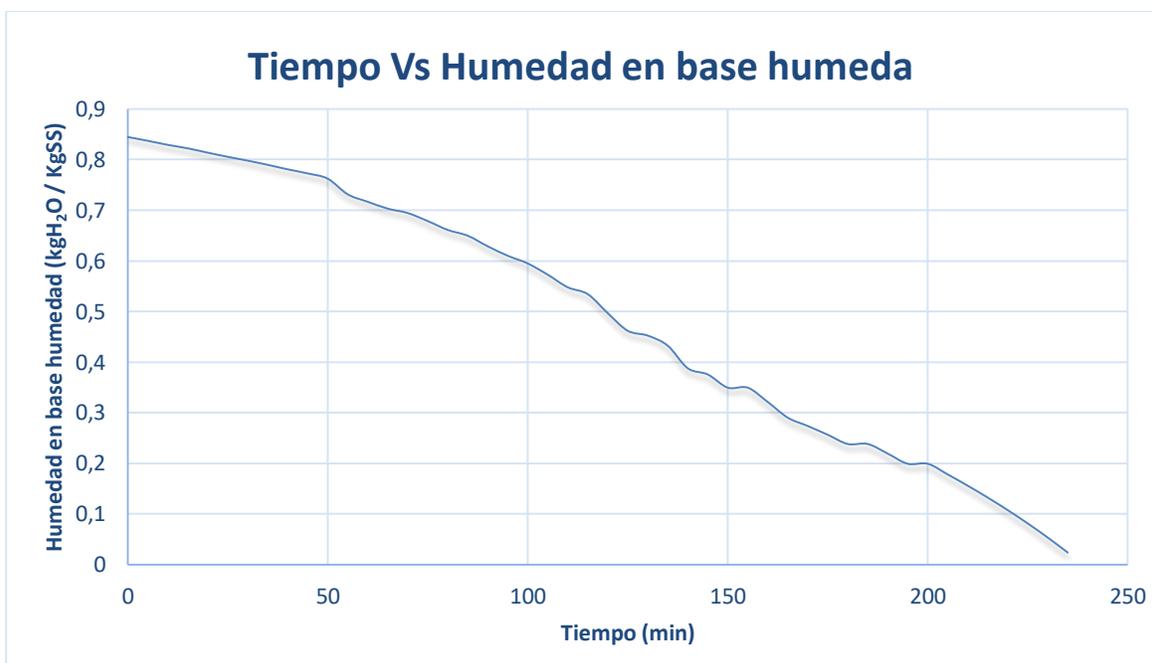


Figura 32:. Humedad en base húmeda Vs Tiempo

Fuente: Autores

En la figura 33 se observa la curva de secado en base seca, de 0 a 60 minutos se evidencia la mayor pérdida de humedad del durazno, de 60 a 160 minutos se presenta una pérdida de humedad no tan constante y de 160 a 240 minutos se presenta una variación muy grande en la cantidad de agua.

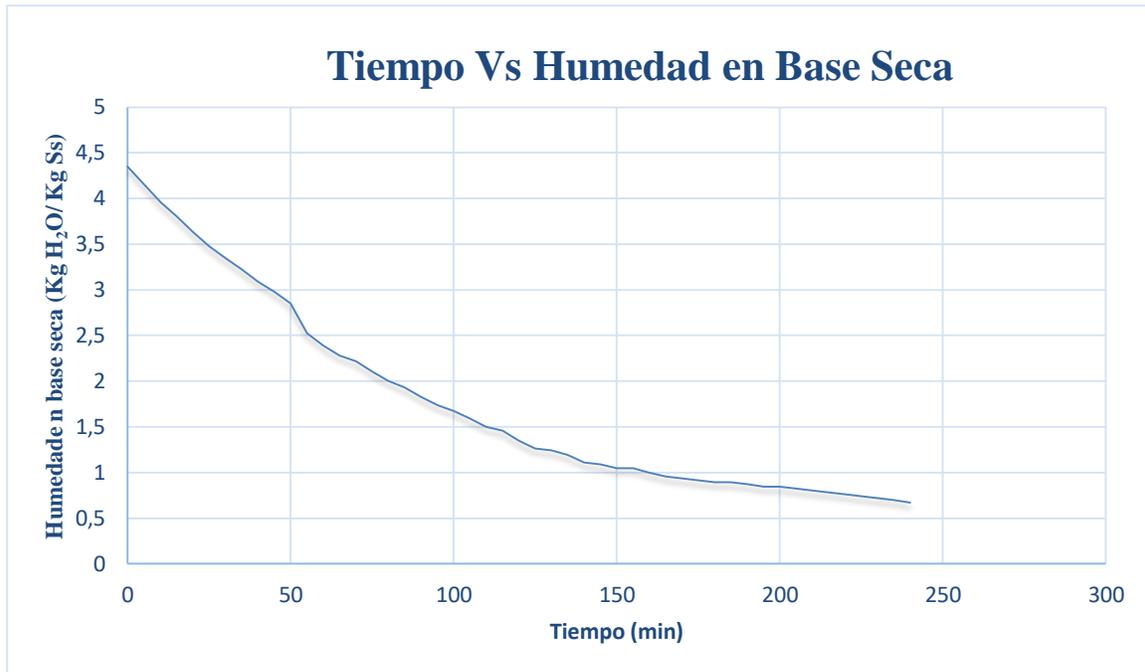


Figura 33: Humedad en base seca Vs Tiempo
Autores



Figura 34: Durazno deshidratado sin pretratamiento
Autores

En la figura 34 se presenta que al no realizarle un pretratamiento a la fruta se observó oxidación del durazno durante el proceso, afectando así propiedades como el color y el sabor.

La segunda prueba se realiza con las condiciones de operación similares a la anterior aplicándole al durazno un pretratamiento de metabisulfito de sodio y una recirculación del 90%.

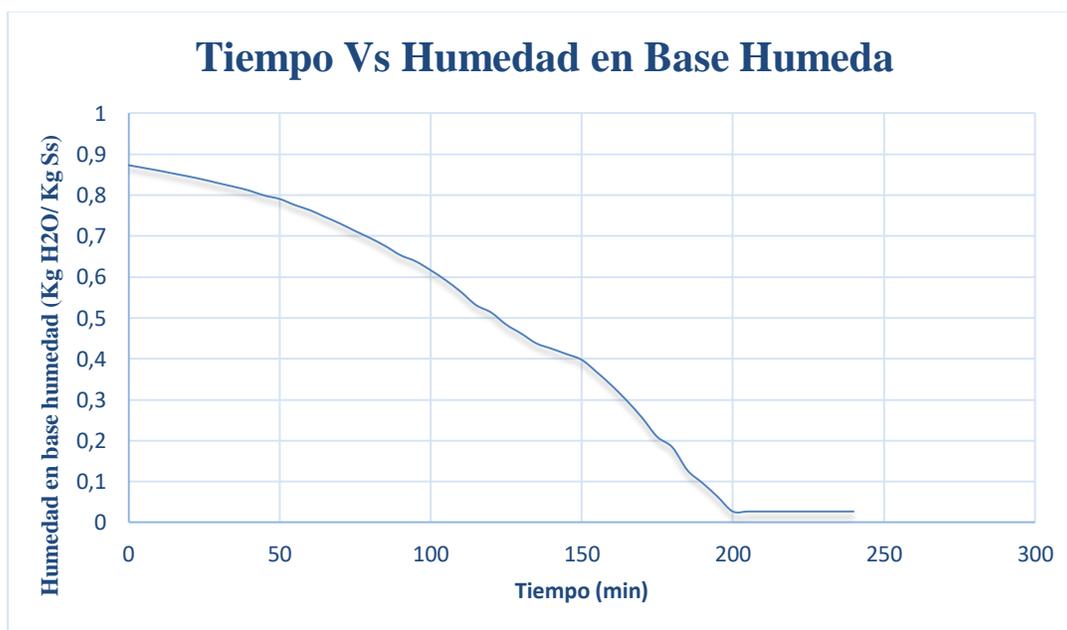


Figura 35: Humedad en base húmeda Vs Tiempo
Fuente: Autores

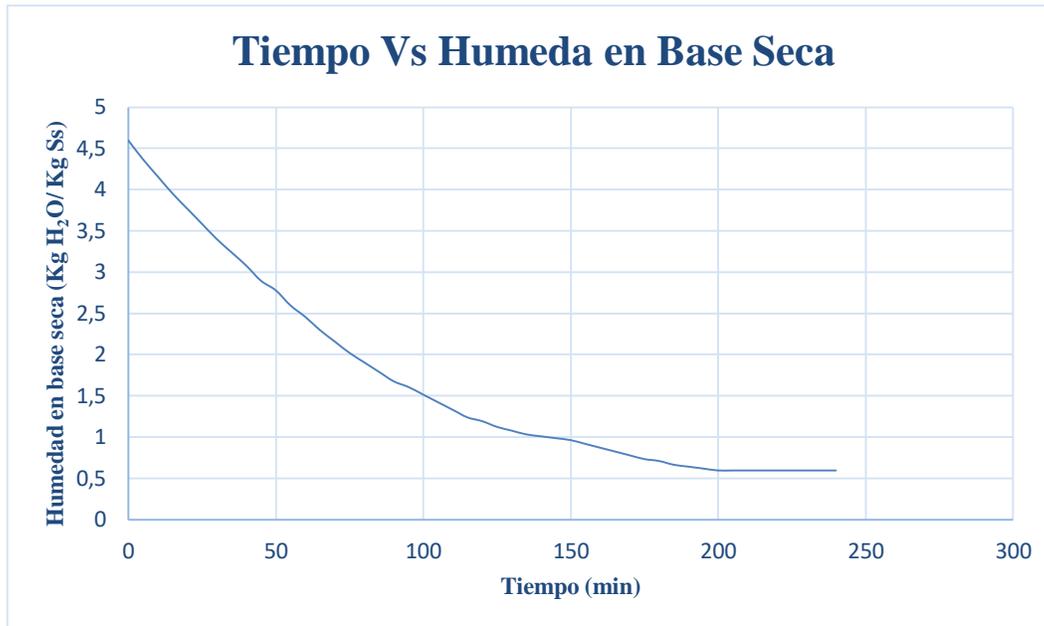


Figura 36: Humedad en base seca Vs Tiempo
Fuente: Autores

La curva decrece al inicio del proceso presentando una reducción importante del contenido de agua debido a la húmeda no ligada que pierde el producto en la primera fase de deshidratación, esta sección en la cual se observa una pendiente semirrecta representa la velocidad de deshidratación constante. Se contempló que una disminución en el flujo de aire trabajando con valores aproximados a la literatura, permitió una adecuada transferencia de masa y energía en el proceso como queda expuesto en las figuras 35 y 36 donde se deduce que se logró una mayor eficiencia obteniendo humedades aún más bajas. Además, una recirculación al proceso del 90% en comparación con el 85% no tuvo mayor efecto debido a que este parámetro se manipulo dentro del rango recomendado por manuales a trabajar.

Por último, se encontró que el pretratamiento fue efectivo, ayudo a conservar el color de la fruta sin permitir oxidación y ningún tipo de daño térmico.



Figura 37: Durazno en metabisulfito de sodio
Autores

Se realizó el pretratamiento de las rodajas de durazno con Metabisulfito de sodio, como se observa en la figura 37, el proceso de deshidratación finalizó a las cuatro horas, con un porcentaje de humedad del 10%.



Figura 38: Durazno deshidratado
Autores

El durazno deshidratado se observa en la figura 38, de acuerdo a las pruebas realizadas se puede concluir que no se presentó oxidación, conservó su aspecto.

La prueba tres se realizó con fresa utilizando unas condiciones de operación de recirculación del 80%, espesor de la fresa de 8 mm, los otros parámetros son iguales a las pruebas anteriores.

Para esta prueba la fresa fue lavada y cortada en espesor de 5 mm de forma vertical como se muestra en las figuras 39 y 40



Figura 39 Fresas en lavado
Autores



Figura 40 Fresas cortadas con el mismo espesor
Autores

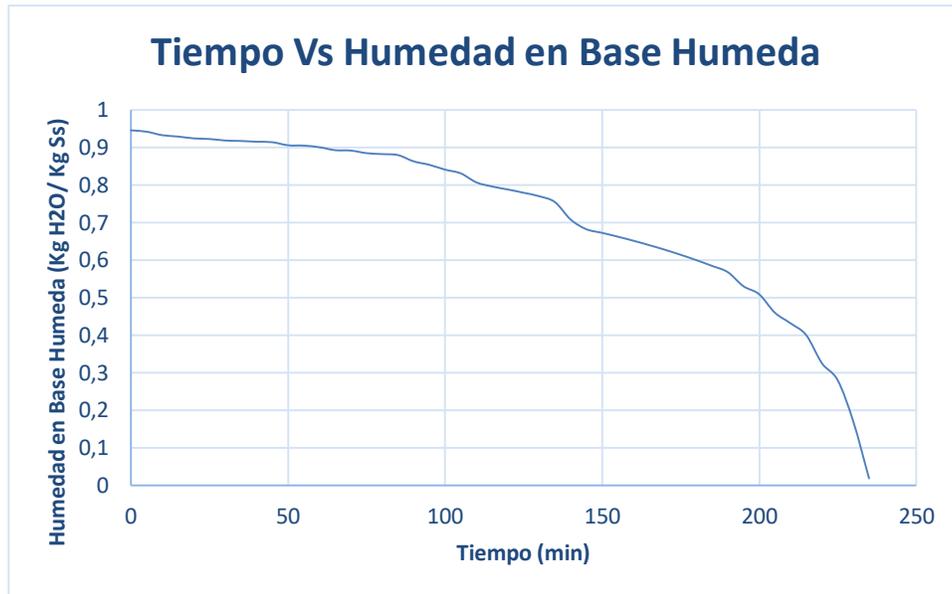
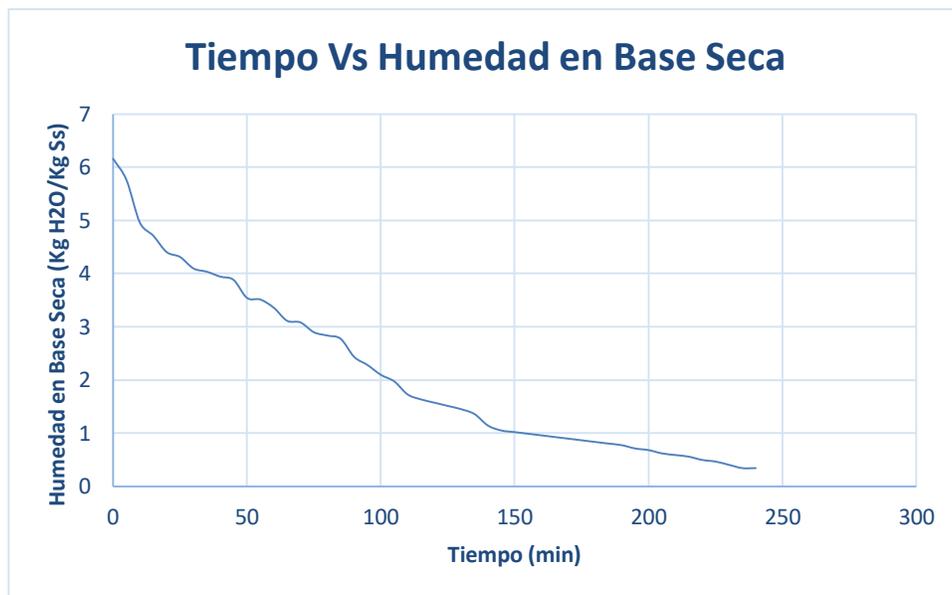


Figura 41: Humedad en base humeda Vs tiempo
Autores



Grafica 42: Humedad en base seca Vs tiempo
Autores

El tiempo de calentamiento es más largo a diferencias de las pruebas anteriores debido a que la fresa presenta mayor porcentaje de humedad a diferencia del durazno esto se puede

observar en la figura 41 donde el tiempo de calentamiento va de 0-90 min, de los 90-140 min se presenta una perdida no muy notable de humedad, de los 140- 220 min es notable la perdida debido a velocidad decreciente y de los 220-240 min es una perdida contante de humedad.

En la gráfica 42 es notable la perdida de humedad en el tiempo de 0-150 min no muy constante.



Figura 43 Fresa deshidratada
Autores

La fresas deshidratada fue expuesta a un pretratamiento con metabisulfito de sodio para su conservación de color y sabor la figura 8 se muestra como queda después de la deshidratación.

Las tablas con los cálculos de las pruebas se presentan en los anexos 3,4 y 5.

7.7 MODELADO MATEMATICO

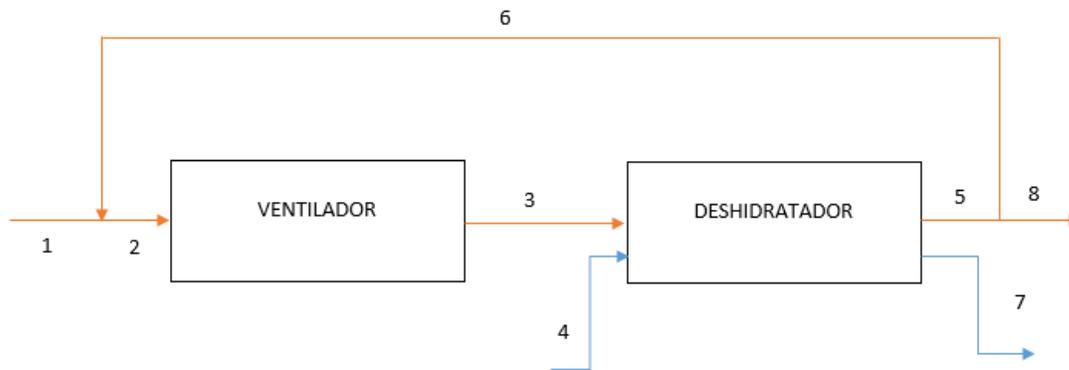


Figura 44: Diagrama de bloques para la función de transferencia
Autores

Balace de masa: secador por componentes

$$F_3 - F_5 = \frac{dm}{dt}$$

Balace de energía

$$E_3 - E_5 + Q_{CONV} = \frac{dE}{dt}$$

Combinación de los balances

$$F_3 H_3 - F_5 H_5 + Q_{CONV} = \frac{dmH}{dt}$$

$$H = C_v * T$$

$$Q_{conv} = hA(T_{sec} - T_{fruta})$$

$$F_3 C_v T_3 - F_5 C_v T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = \frac{dm}{dt} C_v T_{SEC}$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{v} * \frac{dm}{dt}$$

$$F_3 C_V T_3 - F_5 C_V T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = d\rho * v * C_V * \frac{T_{SEC}}{dt}$$

$$F_3 C_V T_3 - F_5 C_V T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = v * C_V [\rho \frac{dT_{SEC}}{dt} + T_{SEC} \frac{d\rho}{dt}]$$

v=constante

$$F_3 - F_5 = v \frac{d\rho}{dt}$$

$$F_3 C_V T_3 - F_5 C_V T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = v * C_V [\rho \frac{dT_{SEC}}{dt} + T_{SEC} \frac{(F_3 - F_5)}{v}]$$

$$F_3 C_V T_3 - F_5 C_V T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = C_v * \rho \frac{dT_{SEC}}{dt} + C_V T_{SEC} F_3 - C_V T_{SEC} F_5$$

$$F_3 = F_5$$

$$F_3 C_V T_3 - F_5 C_V T_5 + hA(T_{SEC} - T_{fruta}) = C_v * \rho \frac{dT_{SEC}}{dt}$$

$$C_v * \rho \frac{dT_{SEC}}{dt} = F_{AIRE} C_V (T_3 - T_{SEC}) + hA(T_{SEC} - T_{fruta})$$

$$C_1 = C_v * \rho$$

$$C_2 = F_{aire} C_V$$

$$C_3 = hA$$

$$C_1 \frac{dT_{SEC}}{dt} = C_2 (T_3 - T_{SEC}) + C_3 (T_{SEC} - T_{fruta})$$

Variables dependientes: Tsec

Variables independientes: T₃, T_{fruta}

Aplicando la transformada de Laplace

$$C_1 S T_{SEC} = C_2 (T_3 - T_{SEC}) + C_3 (T_{SEC} - T_{fruta})$$

Agrupando terminos

$$C_1 S T_{SEC} + C_2 T_{SEC} + h A T_{SEC} = C_2 (T_3) - C_3 (T_{fruta})$$

$$T_{SEC} (C_1 S + C_2 + h A) = C_2 (T_3) - C_3 (T_{fruta})$$

Despajando T_{SEC}

$$T_{SEC} = \frac{C_2}{C_1 S + (C_2 h A)} - \frac{C_3}{C_1 S + (C_2 h A)}$$

$$G_3(S) = \frac{C_2}{C_1 S + (C_2 h A)}$$

$$G_{fruta} = \frac{C_3}{C_1 S + (C_2 h A)}$$

Función de transferencia

$$T_{SEC} = G_{fruta} - G_3(S)$$

Para el cálculo de la función de transferencia utilizamos las siguientes variables ya antes calculadas:

$$\rho = 1,2124 \frac{Kg}{m^3}$$

$$A = 0,12 \text{ m}$$

$$h = 5,866922$$

$$C_v = 0,719$$

$$T_{fruta} = 54^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 60^\circ\text{C}$$

$$F_3 = F_5 = 0,1758 \frac{Kg}{m^3}$$

$$F.T = 54 \left(\frac{5,8669 * 0,12}{(1,2124 * 0,719) * (S) + (0,1758 * 0,719) + (5,8669 * 0,12)} \right) -$$

$$60 \left(\frac{0,1758 * 0,719}{(1,2124 * 0,719) * (S) + (0,1758 * 0,719) + (5,8669 * 0,12)} \right)$$

$$F.T = \left(\frac{38,016}{0,8717(S) + 0,8303} \right) - \left(\frac{7,584}{0,8717(S) + 0,8303} \right)$$

$$F.T = \frac{(33,1385(S) + 31,5647) - (6,6109(S) + 6,2969)}{1,7434(S^2) + 0,7237(S) + 0,7237(S) + 1,6606}$$

$$F.T = \frac{26,5276(S) + 25,2678}{1,7434(S^2) + 1,4474(S) + 1,6606}$$

Ya habiendo obtenido nuestra función de transferencia por medio de balance de masa y balance de energía se ingresó a la herramienta “Simulink” y se multiplico con un “step” de valor del “set point” de la planta “65” en lazo abierto como se muestra en las figuras 45 y 46 para y por medio de un “scope” se pudo ver el comportamiento de la planta sin control figura 47.

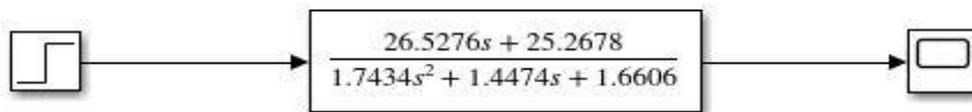


Figura 45: planta en lazo abierto
Autores

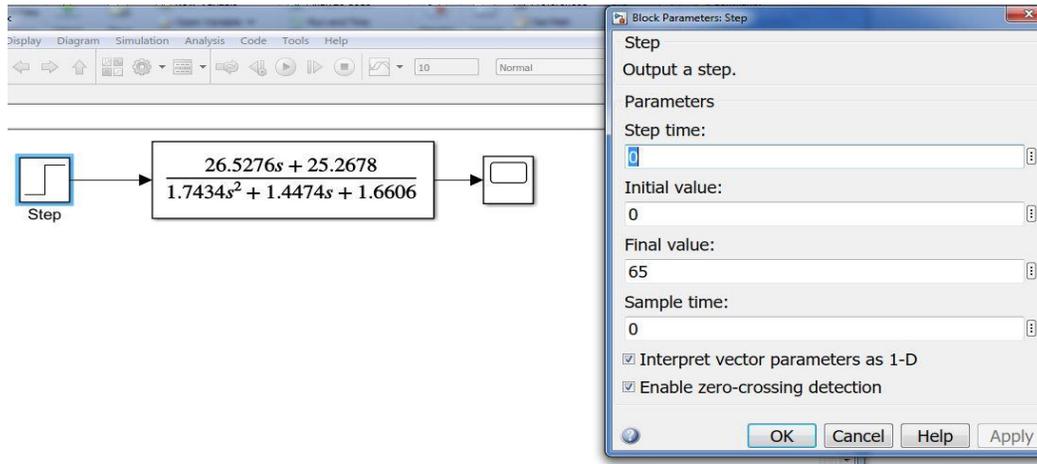


Figura 46: Configuración set point
Autores

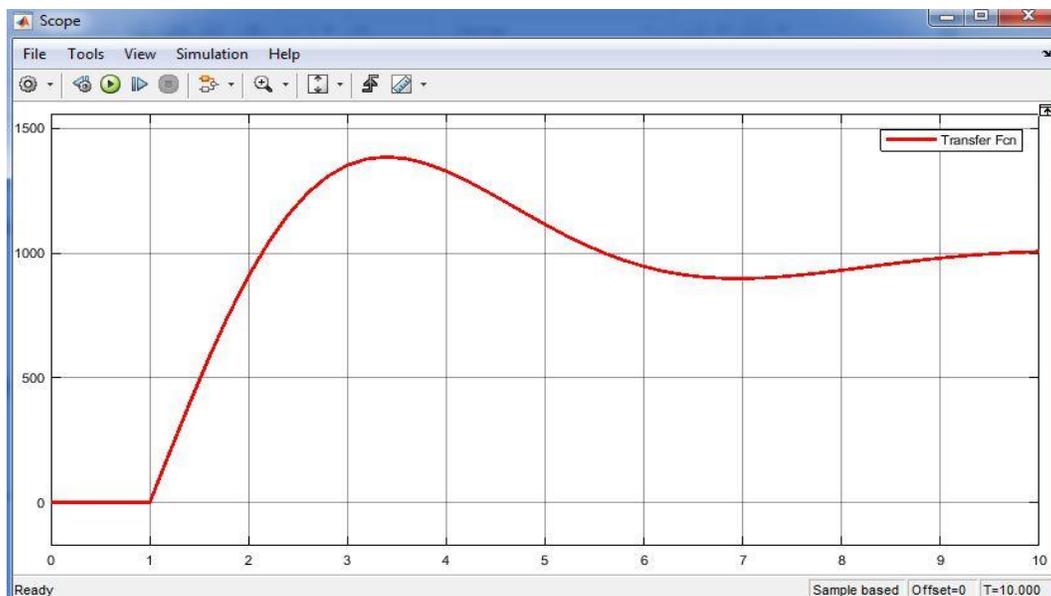


Figura 47: planta con “step” de 65.
Autores

Se analizaron las reglas y los métodos propuestos por Ziegler-Nichols, al tener la gráfica en forma de S figura 48. Se le aplicó el primer método lo cual consiste en caracterizar con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T . Además, se pudo aproximar con un sistema de primer orden y atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$$

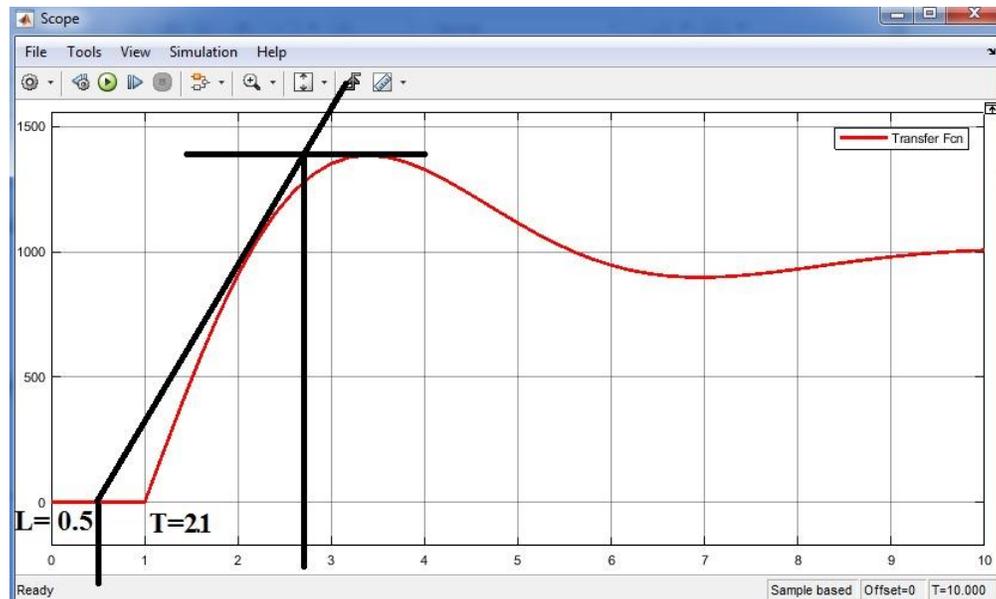


Figura 48: primer método Ziegler-Nichols
Autores

Tabla 17: Valores de sintonización, método uno.

Tipo de controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: Autores

$L=0.5$

$T=2.1$

Controlador P

$$P = \frac{T}{L}$$

$$P = \frac{2.1}{0.5} = 4.2$$

Controlador PI

$$P = 0.9 \frac{T}{L}$$

$$P = 0.9 \frac{2.1}{0.5} = 3.78$$

$$I = \frac{kp}{Ti}$$

$$I = \frac{3.78}{\frac{0.5}{0.3}} = 2.268$$

Controlador PID

$$P = kp$$

$$P = 1.2 \frac{2.1}{0.5} = 5.04$$

$$I = \frac{kp}{Ti}$$

$$I = \frac{5.04}{2(0.5)} = 5.04$$

$$D = kpTd$$

$$D = (5.04)(0.5)(0.5) = 1.26$$

Tabla 18: Valores de las constantes función de la transferencia

Constantes	P	I	D
P	4.2	∞	0
PI	3.78	2.268	0
PID	5.04	5.04	1.26

Fuente: Autores

Controlador proporcional

Este controlador que se calculó por el primer método de Ziegler-Nichols se le aplicó a la función de transferencia como se puede apreciar en la figura 49 y 50, se observó que este controlador proporcional es idóneo, ya que alcanzó el “step” que se aplicó y se estabiliza bastante rápido aun que tiene un sobre pico pero lo corrigió de manera óptima, esto se visualiza en la figura 51.

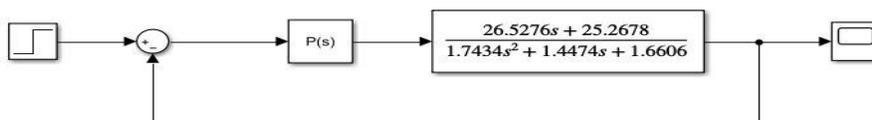


Figura 49: Diagrama retroalimentado control P
Autores

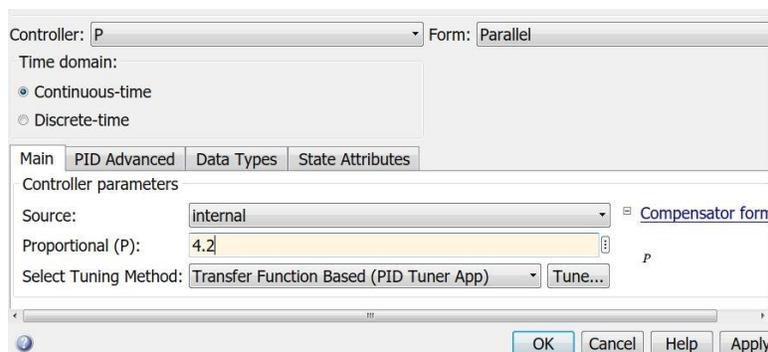


Figura 50: configuración de la constante P.
Autores

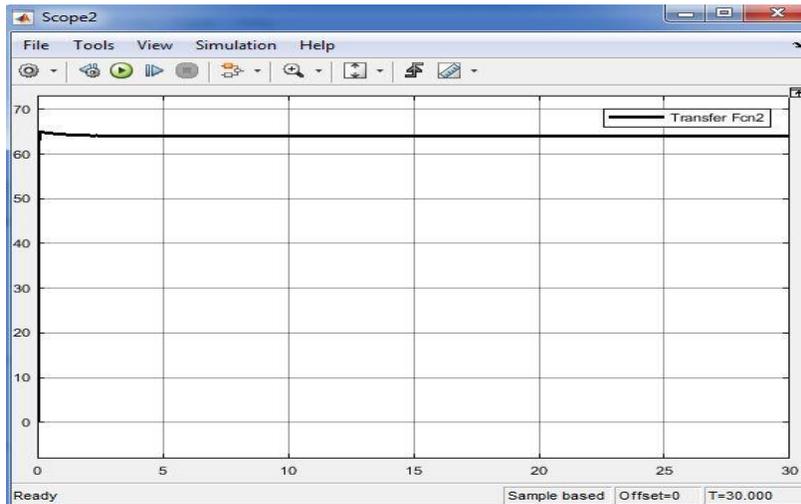


Figura 51: Comportamiento grafica control P
Autores

Controlador proporcional-integral

Este controlador que se calculó por el método uno de ziegler-Nichols se le aplico a la función de transferencia como se puede apreciar en la figura 52 y 53, se pudo observar que este controlador proporcional-integral con retroalimentación dio una buena respuesta debido a que alcanza el “step” que se aplicó; logro estabilizarse aun que tiene un sobre pico y queda oscilando en diferencia del proporcional que si lo estabiliza, pero aun así es muy bueno ya que se mantiene en un rango de 2% en estado estacionario lo cual se puede visualizar en la figura 54.

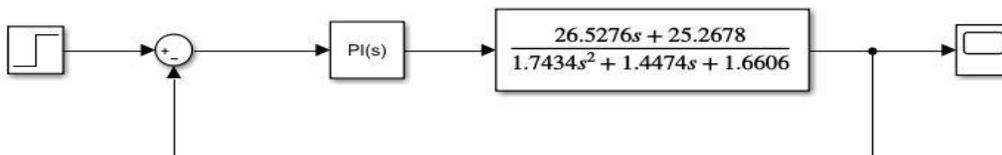


Figura 52: Diagrama retroalimentado control PI
Autores

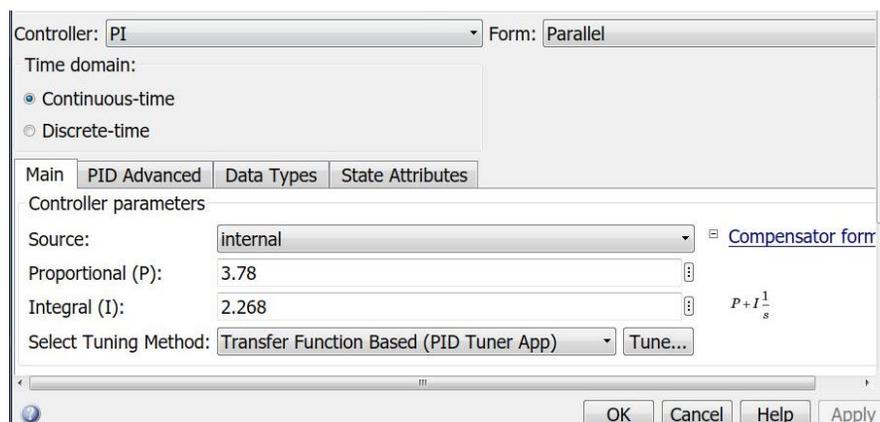


Figura 53: Configuración de las constantes PI.
Autores

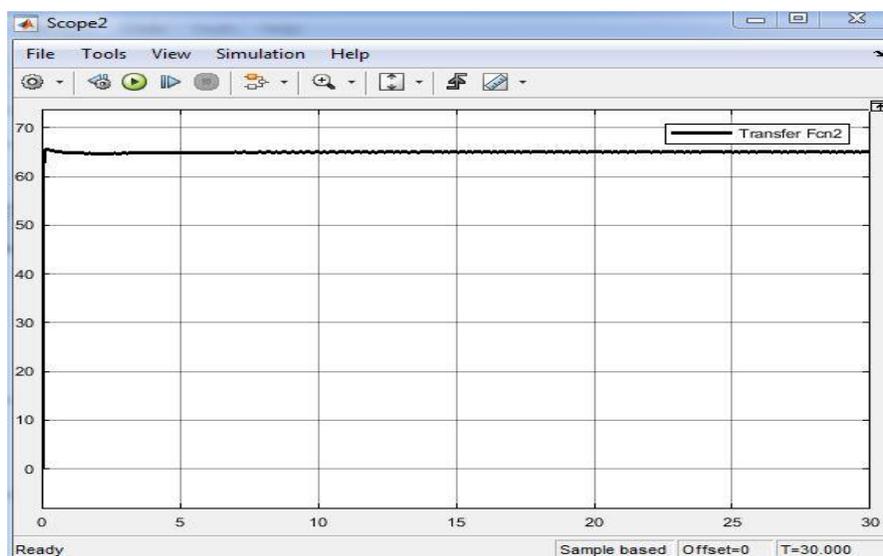


Figura 54: Comportamiento grafica control PI
Autores

Controlador proporcional-integral-derivativo

En las figuras 55 y 56 se puede apreciar la configuración del controlador PID teniendo en cuenta los cálculos por el primer método de Ziegler-Nichols. Este controlador fue mucho mejor que los dos anteriores P y PI, debido a que no mantuvo oscilaciones en estado

estacionario y corrigió muy bien en estado transitorio lo cual no permite que se hagan sobre picos esto se puede apreciar en la figura 57

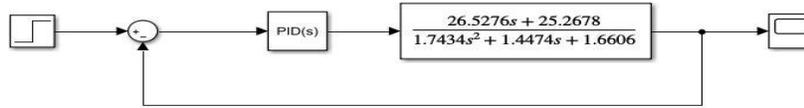


Figura 55: Diagrama retroalimentado control PID
Autores

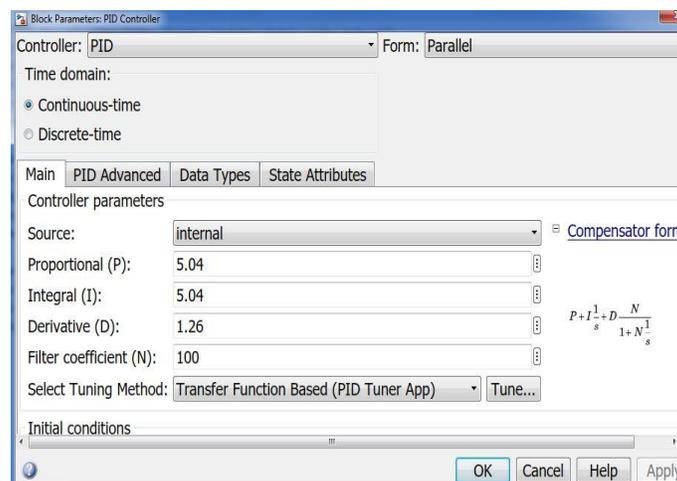


Figura 56: Configuración de las constantes PID.
Autores

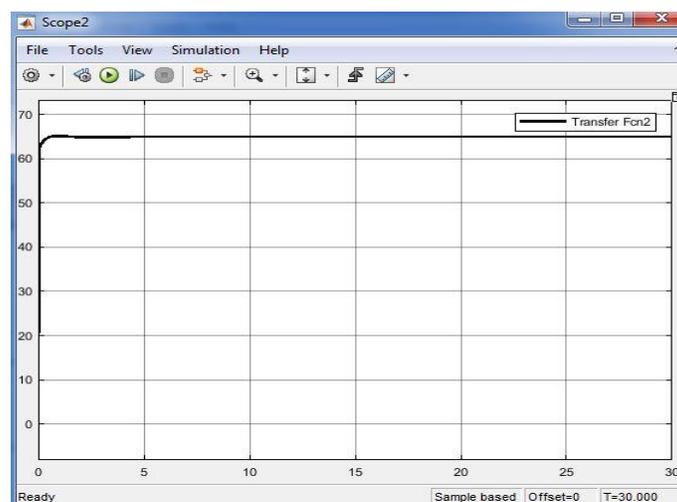


Figura 57: Comportamiento grafica control PID
Autores

CONCLUSIONES

Las pruebas de laboratorio realizadas, permitieron establecer que las condiciones óptimas son: para el durazno, la temperatura del deshidratador 60°C , tiempo de deshidratación 4 horas, y para la fresa la temperatura del deshidratador 65°C y el tiempo de deshidratación 4 horas, para obtener unos productos deshidratados de buena calidad.

Se plantearon tres alternativas de control, donde se seleccionó la número 3, a partir de criterios predefinidos por el método de electre y se identificó que el mejor control de temperatura a aplicarle al deshidratador de bandejas S-001 de la Universidad de Pamplona es un control proporcional, integral y derivativo “PID”.

El diseño de control se llevó a cabo teniendo en cuenta la mejor alternativa, la que describe un control que permitiendo mantener la temperatura de operación estable con la que se pueden alcanzar una mejor deshidratación.

Se implementó el control PID a la deshidratador de bandejas S-001 del laboratorio de ingeniería química de la Universidad de Pamplona, ya que se tomó la data y se utilizó la herramienta ident de Matlab para encontrar una función de transferencia y así implementarla en la herramienta Simulink. Se aplicó un step y se verifico el comportamiento de la gráfica en lazo cerrado, se determinó el método para hallar las constantes y el tipo de controlador. Al analizar la forma de la gráfica en lazo abierto se concluyó que la mejor manera de hallar el controlador era utilizando el primer método de

Ziegler-Nichols, cuando se hallaron las constantes de los tres controladores se procedió en Simulink hacer un lazo cerrado y analizaron las diferentes respuestas de los controladores teniendo como resultado que en la simulación el mejor controlador fue el PID puesto que no presentó sobre picos ni oscilaciones en estado estacionario además su tiempo de subida y de asentamiento fue mejor. Este mismo proceso se realizó para la función de transferencia que encontramos por medio de la balanza de masa y energía.

Se desarrolló el modelado del proceso a partir de la descripción de balances de materia y energía, también se hizo uso del software MATLAB R2016a para ajustar los parámetros del controlador ($P=5,04$, $I=5,04$, $D=1,26$), haciendo al proceso más confiable, estable y seguro.

RECOMENDACIONES

Antes de utilizar el deshidratador se debe leer el manual de operación y mantenimiento que se encuentra en el Anexo 6 hay se encuentra también las recomendaciones de sintonización del controlador...

Para frutas con alto porcentaje de oxidación se hace necesario exponerlas a un pretratamiento previo antes de su deshidratación, para así evitar cambios de color y sabor.

Realizar pruebas con otras frutas adicionales para mirar el comportamiento del deshidratador.

Realizar mantenimiento cada 6 meses por un mecánico especializado.

Lista de referencias

Angel & Marcelo (2009) “Construcción de un deshidratador a base de GLP, para *Solanum sessiliflorum dunal* en la agroindustria la Gambiona”, Ingenieros Químicos, Escuela de Ingeniería Química, Ecuador.

Arango, R. & Camacho, G (1986). Estudio Preliminar para la Osmodeshidratación Directa de: Curuba, Piña, Guayaba y Breva. En: CURSO TALLER “DESHIDRATAACION OSMOTICA DIRECTA DE VEGETALES (Santafé de Bogotá. 1986). Memorias del Curso Taller “Deshidratación Osmótica Directa de Vegetales. Santafé de Bogotá: Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos,. 12p

Asae, d271,2. (1980) Psychrometric data; Agricultural Engineers Yearbock. St. Joseph, Ameritan Society of Agricultural Engineers, Michigan, U.S.A.

Ashrae. (1977). Handbook of fundamentals. Chapter 5: Psychrometries, Ameritan Society Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers, . New York, U.S.A.

Barreiro, J. & Sandoval, A. (2001). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial Equinoccio. 359 p

Barret, d.m & Theerakulrait, C. (1995). Quality indicators in blanched, frozen, stored vegetables. Food Tech. 49 (1): 62-65

Bueno & Paredes (2017) “Desarrollo de un sistema de deshidratado de fruta de bajo costo mediante el control de temperatura para pymes”, Ingenieros Electrónicos, Escuela de Ingeniería Electrónica, Perú.

Bretado et al.(2015)”Optimizacion de sistemas solares par deshidratación de productos agrícolas mediante simulación dinámica en trnsys” CICERMAD,Centro de innovación y competitividad en energía renovable y medio ambiente de Durango, Mexico

Casp, A. & Abril, J. (1999). Procesos de conservación de alimentos. Ediciones Mundi=Prensa. Madrid, España. 494 p

Castañeda & Canunga (2017) “Desarrollo de un sistema de control y monitoreo mediante récipe Batch para un deshidratador a vapor de vegetales en la facultad de ciencias”, Ingenieros en electrónica, control y redes industriales, Escuela de Ingeniería en electrónica, control y redes industriales, Ecuador.

Conorado, Alfonso P., Hernandez, Jose E.(1992) Psicrometria. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- Echeverriarza, D. M. P. (2005). GUIA DE USO de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes (f. C. P. d. Almada, Trans.): Educación MERCOSUR; UNESCO Montevideo.
- Farkas, B.E. (1994) Modeling immersions frying as a moving boundary problem. PhD dissertation. University of California, Davis.
- Fennema, O. (2000) Química de los Alimentos. 2ª ed. Zaragoza. España. Acribia. 1258 p.
- Ferrucho A & Ruíz D (2013). evaluación y comparación del comportamiento agronómico de dos cultivares de fresa ('albion' y 'monterey') sembrados a libre exposición y bajo macrotúnel en la sabana de bogotá (colombia). Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ciencias básicas y aplicadas. Tesis biología aplicada. Cajicá. .
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*: Compañía Editorial Continental.
- Giraldo, E (2014) "Control de temperatura y humedad relativa para un deshidratador solar de frutas" Tecnóloga mecánica, Escuela de Tecnología Mecánica, Pereira.
- Heldmann D & Singh P (1997). Introducción a la ingeniería de alimentos. Acribia S.A.. Estados Unidos. Segunda edición. Página 185. I.S.B.N. 978-84-200-1124-0. [En línea] Disponible en (<http://es.slideshare.net/DanielDuarte22/intr-oduccion-a-la-ingenieria-de-los-alimentos-paul-singh-dennis-heldman>)
- Hernandez el at.,(2015). "Evaluation of alternative drying techniques for the earthworm flour processing", *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(1):55-71
- Ivonne & Jorge (2006) "Diseño de un secador de polen con sistema de control y supervisión de temperatura", *Ingenieros de diseño y automatización electrónica*, Universidad de la Salle, Bogotá.
- Jiménez, & Pinos, (2014). "Diseño y construcción de un secador tipo bandejas para biomasa requerido por el cestta-espoch". Escuela superior politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International Journal of Food Science & Technology*, 42(1), 65-69. doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.01210.x
- Lenard, A. & Flink, J. (1984) Osmotic Concentration of Potato. I. Criteria for the End – point of the Osmosis Process. En: *Journal of Food Tecnology*. Vol 19; p.45 – 63.

Mendoza. H (2007) “Seminario: Transferencia de masa y calor”, Introducción.

Menchú M T & Méndez H. (2012), Tabla de composición de alimentos de Centroamérica. Incap. Panamá. Segunda edición. Página 56. I.S.B.N. 99922-880-2-7. [En línea] Disponible en (<https://deymergf.les.wordpress.com/2013/07/tabla-de-composicion-de-alimentos-paractoamerica-del-incap.pdf>)

Patiño.A & Hernandez. S (2018) DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE DURAZNO A ESCALA PILOTO. Universidad de Pamplona, Colombia

Quevedo-García, E., Darghan, A. E., & Fischer, G. (2017). Clasificación de variables morfológicas del duraznero (*Prunus persica* L. Batsch) ‘Jarillo’ en la montaña santandereana Colombiana mediante análisis discriminante lineal. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 39-47. doi: 10.17584/rch.2017v11i1.6140

Rastogi et al M.S. (2004) Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots, *J Food Engineering*; 65: 287-292.

Rees, J.A.G & Bettison, J. (1993). Enlatado. En: Manual de industrias de los alimentos. Ranken, M.D. (ed). Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España. 242-292.

Roberts, A.C. & McWeeny, D.J. (1972). The uses of sulphur dioxide in the food industry. *J. Fd Technol.*, 7, 221-238.

ROMERO, C. (1993): Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Editorial, Madrid.

ROMERO, C. (1996): Análisis de las decisiones multicriterio. Isdefe, Madrid.

Roselló, C., Cañellas, J., Santiesteban, I. & Mulet, A. (1993). Simulation of the absorption process of sulphur dioxide in apricots. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, 26, (4), 322- 328.

RUIZ, J. (2015): Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

Santana & cubillos, (2016).” PROPUESTA DE DISEÑO DE UN DESHIDRATADOR TIPO BANDEJA PARA LA PRODUCCIÓN DE FRUTAS ORGÁNICAS TIPO SNAKS PARA ECOVITALE ORGÁNICO”, Fundación universidad de américa, facultad de ingenierías, programa de ingeniería química, Bogotá.

Saravacos, G. D., & Kostaropoulos, A. E. (2002). *Handbook of Food Processing*

Equipment

Stafford, A.E, et al B.E. (1972). Absorption of aqueous bisulfite by apricots. *J. Food Sci.*, 37, 941-943

Sharma, et al. (2003). Operaciones unitaria y práctica de laboratorio. Editorial Limusa S.A. Mexico, D.F. 348 p.

Singh, R. P., Heldman, D. R., Bacaicoa, P. G., & Labiano, F. J. G. (1997). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*: Acribia.

Silva, M.B. (1972). Termodinâmica. Editora Mc. Graw-Hill do Brasil, Sao Paulo, Brasil

Smith, C. Corripio, A. (1991). Principles and Practice of Automatic Process Control, second edition. Recuperado de [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/.backup_20062011/.DEIC.back/docs/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Principles_and_Practice_of_Automatic_Process_Control_%5BSmith_&_Corripio,_Wiley_1997%5D\(782s\).pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/.backup_20062011/.DEIC.back/docs/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Principles_and_Practice_of_Automatic_Process_Control_%5BSmith_&_Corripio,_Wiley_1997%5D(782s).pdf)

Velásquez. L (2007) “Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos”, Ingeniera Química, Universidad de las Villas, Cuba.

Vique, L (2016) “Diseño e implementación de un sistema scada para controlar el deshidratador de bandejas a gas de la facultad de ciencias”, Ingeniera en electrónica, control y redes industriales, Escuela de Ingeniería en electrónica, control y redes industriales, Ecuador.

Viveros & Castellanos (2017) “Diseño e implementación de un prototipo de deshidratador híbrido (solar-eléctrico) e implementación de su sistema de control”, Ingenieros Eléctricos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

Wedzicha, B.L. (1987). Review: Chemistry of sulphur dioxide in vegetable dehydration. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 22, 433-450.