

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE
DURAZNO A ESCALA PILOTO**

Autor

SAHIDY ANDREA HERNANDEZ BERBESI

YODANI ANDRES PATIÑO PEÑALOZA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



PAMPLONA, 2018

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE
DURAZNO A ESCALA PILOTO**

Autor (es):

**SAHIDY ANDREA HERNANDEZ BERBESI
YODANI ANDRES PATIÑO PEÑALOZA**

**Trabajo de grado para obtener el título de
Ingeniero Químico**

DIRECTOR:

MSc. Sandra Milena Zambrano Contreras

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



PAMPLONA, 2018

DEDICATORIA

Primero a Dios que ha estado presente en cada uno de los procesos vividos en el transcurso de la carrera mostrándome el camino por el cual recorrer, dándome fuerzas para avanzar y no decaer.

A mi padre por su comprensión, su apoyo y por los valores inculcados que han hecho de mi un hombre agradecido y responsable.

A mi madre por ser esa fiel creyente en mí, por darme su total confianza en lo que he podido lograr hasta ahora y por ser en mi vida ese motor que no me permite desfallecer nunca para seguir luchando por mis sueños.

A Paula por ser ese ángel que apareció en este proceso siendo una mujer incondicional que ha estado a mi lado en los buenos y malos momentos.

Andrés Patiño

DEDICATORIA

A Dios y a la virgen por permitirme llegar a la culminación de este gran reto y siempre ser la guía más grande en mi vida

A mi mamá luz, por ser ese angelito que me acompaña desde el cielo gracias por todo lo que me diste y por ser la mejor mujer del mundo para mí.

A mi papá por confiar en mí y siempre apoyarme dándome esa voz de aliento que necesitaba, gracias infinitas por ayudarme a ser mejor cada día con tu alegría.

A mi mamá esa mujer que lo ha dado todo de sí para hacer de mí una excelente mujer, por ayudarme a vencer muchas barreras durante estos años de universidad y en la vida.

A Brayan por ser mi apoyo incondicional en todo momento y por ser un pilar muy importante en mí proceso profesional y en la vida.

A mi hermano por ser mi fortaleza y esa persona por la cual debo ser mejor cada, mi compañero y amigo.

Sahidy Hernández

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la virgen por todo su amor incondicional que no nos permitieron desfallecer nunca.

A la ingeniera Sandra Zambrano por su orientación profesional que hizo posible este trabajo.

A Julio Téllez y al Ingeniero Francisco Guerrero un enorme agradecimiento por su tiempo, disposición y compromiso en partes vitales de este proyecto.

Al magister Álvaro Villamizar por su coordinación como director del programa de Ingeniería Química.

A la Universidad de Pamplona por hacer posible nuestra formación académica prestando sus instalaciones durante todos estos años.

Por último a nuestros familiares y amigos que estuvieron presentes en los diferentes momentos de esta etapa de nuestra vida.

No se requiere estar preparado para iniciar por aquello que anhelas, pero si es necesario iniciar para estar preparado.

RESUMEN

El presente proyecto plantea el diseño, construcción y montaje de un deshidratador de frutas, probado con pulpa de durazno (*Prunus pérsica*), para ser usado en el laboratorio de operaciones unitarias, del programa de Ingeniería Química en la Universidad de Pamplona, con el fin de apoyar la formación de los nuevos profesionales en la carrera. Para seleccionar la mejor alternativa de equipo a diseñar se utilizó el método de Electra. Posteriormente, se analizaron las características físicas del material a secar antes y después de llevarse a cabo la deshidratación, para establecer su respectiva curva de secado y compararla con las curvas obtenidas en otras investigaciones. Asimismo, en base a heurísticas de diseño e información de manuales, se especificaron las partes principales, facilidades de uso y configuraciones añadidas al equipo. Seguidamente se realizó el balance de masa y energía del proceso, se especificó el control usado para el óptimo funcionamiento del equipo, se realizaron los planos mecánicos del mismo y sus partes, PFD, P&ID, isométrico y plot plan. Por último, se definió el análisis de riesgos y se elaboró el respectivo manual de operación.

Palabras clave:

Deshidratación, Método de electra, Convección forzada, Psicrometría, Curva de secado, Durazno (*Prunus pérsica*).

ABSTRACT

The present project proposes the design, construction and assembly of a fruit dehydrator, tested with peach pulp (*Prunus pérsica*), to be used in the unitary operations laboratory, of the Chemical Engineering program at the University of Pamplona, in order to support the training of new professionals in the career. To select the best equipment alternative to for design the Electra method was used. Subsequently, the physical characteristics of the material to be dried before and after the dehydration was carried out were analyzed, to establish its respective drying curve and compare it with the curves obtained in other investigations. Also, based on design heuristics and manuals information, the main parts, ease of use and configurations added to the equipment were specified. Then the mass and energy balance of the process was performed, the control used for the optimal functioning of the equipment was specified, the mechanical planes of the same and their parts were made, PFD, P & ID, isometric and plot plan. Finally, the risk analysis was defined and the respective operation manual was prepared.

Keywords:

Dehydration, electra method, forced convection, psychrometry, Drying Curve.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
2.1 Objetivos	15
2.1.1 Objetivo general	15
2.1.2 Objetivos específicos.....	15
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1 Generalidades de la deshidratación	16
3.2 Variables que afectan la deshidratación.....	18
3.2.1 Humedad relativa	19
3.2.2 Velocidad y flujo del aire	19
3.2.3 Temperatura de bulbo seco.....	21
3.2.4 Temperatura de bulbo húmedo	21
3.3 Tipos de deshidratadores.....	21
3.3.1 Deshidratador de horno o estufa	24
3.3.2 Deshidratador de gabinete o bandeja	24
3.3.3 Deshidratador rotativo	25
3.3.4 Deshidratador tipo túnel	26
3.3.5 Deshidratador de cinta transportadora.....	27
3.3.6 Deshidratado por atomización	28
3.3.7 Deshidratado por lecho fluidizado	29
3.4 Curva de secado.....	30
3.4.1 Velocidad constante	31
3.4.2 Velocidad decreciente	33
3.5 Psicrometría.....	35
3.5.1 Diagrama psicrométrico	36
3.5.2 Propiedades termodinámicas del aire húmedo.....	37
3.6 Antecedentes	38
4. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	41
4.1 Distribución del agua en los alimentos.	42
4.1.1 Actividad del agua.....	43
4.2 Pretratamiento para vegetales y frutas	45

4.3	Deshidratación de frutas	47
4.3.1	Durazno (Prunus pérsica)	48
4.3.2	Producción de durazno en Colombia	49
4.3.3	Variedades del durazno en Colombia.....	49
5.	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN MULTICRITERIO.....	52
5.1	Selección del equipo de deshidratación	52
5.1.1	Alternativa 1: Deshidratador de horno o estufas.....	52
5.1.2	Alternativa 2: Deshidratador de bandejas.....	53
5.1.3	Alternativa 3: deshidratador de túnel	54
5.1.4	Alternativa 4: deshidratador de lecho fluidizado	56
5.2	Análisis de alternativas	57
5.3	Aplicación del método de electra.	59
6.	DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO	62
6.1	Diagrama de bloques del pretratamiento	62
6.2	Bases de diseño	62
6.3	Diagrama de bloques del proceso de deshidratación.....	63
6.3.1	Descripción del proceso de deshidratación	64
6.4	Diagrama de flujo del proceso de deshidratación	64
6.4.1	Balance de masa.....	68
6.4.2	Balance de energía	72
6.5	Simulación del proceso de deshidratación.....	77
6.6	Diagrama P&ID del proceso	78
6.6.1	Filosofía de control	80
6.7	Condiciones normales de operación	81
6.8	Data Sheet de servicios industriales requeridos	83
6.9	Data sheet de equipos principales del equipo de deshidratación	83
6.9.1	Especificaciones de los equipos principales en el proceso de deshidratación.	84
6.9.2	Componentes auxiliares que influyen en el proceso de deshidratación.	86
6.10	Diagrama isométrico del equipo de deshidratación.....	91
6.11	Plot plant	91
7.	CONTROL DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN.....	92
7.1	Componentes utilizados en el equipo	92

7.1.1 Circuito impreso.....	98
8. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN.....	99
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	101
CONCLUSIONES.....	108
10. RECOMENDACIONES.....	108
11. ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación y tipos de deshidratadores industriales.....	23
Figura 2. Deshidratador tipo horno.....	24
Figura 3. Deshidratador de bandeja.	25
Figura 4. Deshidratador rotativo.....	26
Figura 5. Deshidratador tipo túnel.	27
Figura 6. Deshidratador de cinta transportadora.	28
Figura 7. Deshidratado por atomización.	29
Figura 8. Deshidratado por lecho fluidizado.	30
Figura 9. Curva de secado	30
Figura 10. Carta Psicométrica	37
Figura 11. Deshidratador de horno o estufa	52
Figura 12. Deshidratador de bandejas.....	54
Figura 13. Deshidratador de túnel.....	55
Figura 14. Fases de un lecho fluidizado en funcionamiento	56
Figura 15. Diagrama de barras para la selección del tipo de deshidratador.....	61
Figura 16. Diagrama de bloques del proceso de acondicionamiento de la fruta a deshidratar	62
Figura 17. Diagrama de bloques del proceso de deshidratación	64
Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de deshidratación (PFD)	65
Figura 19. Propiedades del aire a la entrada, <i>T_B</i> s: 18; % <i>HR</i> : 87,4%.	66
Figura 20. Propiedades del aire a la salida, <i>T_B</i> s: 60; % <i>HR</i> : 95%.....	67
Figura 21. Simulación del proceso de deshidratación	77
Figura 22. Diagrama PI&D del proceso de deshidratación de durazno.....	80
Figura 23. Cámara de deshidratación.....	84
Figura 24. Ventilador axial de 110/120V.....	85
Figura 25. Resistencias eléctricas	86
Figura 26. Aislante de fibra de vidrio.	87
Figura 27. Soporte con bandejas.....	88
Figura 28. Deflectores del equipo de deshidratación.....	88
Figura 29. Tubería del equipo de deshidratación.....	89
Figura 30. Damper del equipo de deshidratación	90
Figura 31. Anemómetro	90
Figura 32. Curva para la determinación de la humedad del durazno.....	101
Figura 33. Humedad en base húmeda Vs Tiempo	102
Figura 34. Humedad en base seca Vs Tiempo	103
Figura 35. Fruta deshidratada.....	103
Figura 36. Humedad en base húmeda Vs Tiempo	105
Figura 37. Humedad en base seca Vs Tiempo	105
Figura 38. Durazno en pretratamiento con bisulfito de sodio	106
Figura 39. Durazno deshidratado.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición nutricional del durazno producido en Colombia.....	48
Tabla 2. Variedades de cultivo de durazno en algunas regiones de Colombia	49
Tabla 3. Características del fruto según su variedad.....	50
Tabla 4. Ventajas y desventajas del deshidratador de horno.....	53
Tabla 5. Ventajas y desventajas del deshidratador de bandejas	54
Tabla 6. Ventajas y desventajas del deshidratador de túnel	56
Tabla 7. Ventajas y desventajas del deshidratador de lecho fluidizado	57
Tabla 8. Factores de decisión en el método de electra.....	58
Tabla 9. Ponderación del vector peso	59
Tabla 10. Análisis de importancia	59
Tabla 11. Matriz de concordancia.....	60
Tabla 12. Matriz de discordancia.....	60
Tabla 13. Priorización de alternativas según dominancia entre filas y columnas	60
Tabla 14. Condiciones del aire de entrada y salida	69
Tabla 15. Principales compuestos presentes en el Durazno	73
Tabla 16. Parámetros de las corrientes de entrada y salida del proceso.....	78
Tabla 17. Variables en condiciones de diseño.....	82
Tabla 18. Variables en condiciones normales de operación.....	82
Tabla 19. Data Sheet de servicios industriales requeridos.	83
Tabla 20. Data Sheet de equipos principales del equipo de deshidratación.	83
Tabla 21. Costos de los materiales y servicios requeridos para la fabricación del equipo de deshidratación.	99
Tabla 22. Costo de los equipos de deshidratación	100
Tabla 23. Clasificación de los componentes del deshidratador.	129
Tabla 24. Plan de mantenimiento del equipo.	130

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de deshidratación es usado actualmente en diversas industrias y es clave en el procesamiento de alimentos, fármacos y la agroindustria. Entender su funcionamiento y las variables que afectan esta operación unitaria, es útil para el fortalecimiento de los conocimientos que debe desarrollar el ingeniero químico.

Por tal motivo, se planteó el diseño y la construcción de un deshidratador de frutas, para ser usado en las prácticas de laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Pamplona.

Durante el desarrollo de este trabajo se establecieron las condiciones de operación y diseño del deshidratador de bandejas, para que el equipo sea empleado de manera eficiente, prolongar su tiempo de vida útil, y complementar los conocimientos adquiridos en las aulas de clase de una manera práctica.

Se definió usar durazno para realizar las pruebas en el deshidratador, debido a que en la región es ampliamente producido, en Norte de Santander por lo general se encuentran dos tipos conocidos como Jarillo y Gran Jarillo, con una producción reportada de 5395 toneladas en el año 2017.

2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto nace debido a la oportunidad que se presenta ante la falta de equipos de laboratorio para llevar a cabo prácticas de operaciones unitarias. Debido a lo anterior, se decidió diseñar y construir un deshidratador de bandejas que permita a los estudiantes de la Universidad de Pamplona, conocer la operación y complementar de manera práctica, los conocimientos impartidos en las aulas de clase.

De igual manera, los docentes pueden apoyarse en el funcionamiento del equipo como herramienta pedagógica, para complementar los procesos de enseñanza, y proponer futuras prácticas de laboratorio en diversas temáticas enseñadas a lo largo de la carrera.

Actualmente la deshidratación en la industria es usada principalmente como método de conservación de alimentos. Asimismo, su manejo permite optimizar costos de almacenamiento y transporte, lo anterior se logra, debido a la disminución de la fase acuosa, la cual impide cualquier actividad microbiana y contribuye a disminuir el área superficial, el volumen y el peso del producto.

La deshidratación se plantea como un procedimiento para almacenar y conservar alimentos en épocas de sequía, poca cosecha, baja producción o condiciones climáticas adversas. Debido a esto se convierte en una alternativa de gran uso para la agroindustria en Colombia. La empresa Frutos Secos Macarito ubicada en el municipio de Tinjacá en Boyacá deshidrata 13 clases de frutas que se comercializan en paquetes tipo snacks de 20, 40 y 70 gramos, cada uno de los cuales contiene cinco frutas y son comercializadas en el interior del país.

Por último este trabajo se presentó como una alternativa para aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, fortaleciendo el área de diseño y control de procesos. Con

referencia a lo anterior, el equipo cuenta con la versatilidad para implementar mejoras de proceso y del sistema de control.

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Diseñar, construir e instalar un deshidratador a escala piloto para el laboratorio de operaciones unitarias del programa de Ingeniería Química.

2.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Evaluar los tipos de deshidratadores comerciales que existen y sus tecnologías.
- ✓ Seleccionar el tipo de deshidratador más adecuado para el proceso por el método de Electra.
- ✓ Efectuar los cálculos de ingeniería para el diseño del deshidratador y su respectivo dimensionamiento.
- ✓ Realizar el diseño mecánico del deshidratador y dimensionamiento de equipos auxiliares.
- ✓ Ejecutar pruebas preliminares del deshidratador para establecer algunos variables del proceso (flujo de aire y recirculación, humedad, temperatura, calor transferido).
- ✓ Elaborar el manual de operación del equipo, junto con el check list de operación y troubleshooting.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades de la deshidratación

La deshidratación es una operación unitaria que se basa fundamentalmente en retirar la humedad de una sustancia o producto evaporando el agua que este contiene por medio de una corriente circundante de aire, transfiriendo el líquido desde un sólido húmedo hasta una fase gaseosa no saturada (A. M. J. Jiménez & Pinos, 2014). Con la eliminación de agua en este proceso se consigue detener el crecimiento de microorganismos, además de retardar muchas reacciones indeseables, al igual se logran disminuir los costes de envasado, manejo, almacenado y transporte, ya que se disminuye el peso del alimento, y en algunos casos el volumen. (Albert Ibarz & Barbosa-Canovas, 2005). El contenido de humedad final de una sustancia deshidratada, varía producto a producto, se supone ocasionalmente que el producto no contiene agua y se denomina totalmente seco, sin embargo, lo más frecuente es que el producto tenga un porcentaje de agua. Por ende, el término de deshidratación es relativo y significa que hay una reducción del contenido de humedad desde un valor inicial a uno final. (Reyes, 2011)

Los términos deshidratación y secado son comúnmente confundidos en ingeniería de procesos, aunque en la ciencia y tecnología de los alimentos, el secado es la eliminación térmica del agua hasta un valor aproximado de 15 a 20% de humedad (base seca), que es el contenido de humedad en el equilibrio de los productos agrícolas secos (por ejemplo, frutas y granos) en condiciones de aire ambiente (atmosférico). Por otro lado la deshidratación

consiste en secar alimentos hasta aproximadamente el 2-5%, por ejemplo, vegetales deshidratados, leche y café (G. Saravacos & Kostaropoulos, 2015) .

Cuando un sólido húmedo es sometido a un proceso de deshidratación, se presentan dos subprocesos:

- Transferencia de masa en humedad interna del solido hacia la superficie de este y su subsecuente evaporación. El movimiento de la humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física del sólido, su temperatura y su contenido de humedad.
- Transferencia de energía en forma de calor por medio de conducción, convección o radiación, aunque en su mayoría el de mayor uso es la convección donde la transferencia se da desde los alrededores para evaporar la humedad de su superficie (A. M. J. Jiménez & Pinos, 2014). Este subproceso depende las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, precisión, área de exposición y el tipo de deshidratador empleado. (Valverde, 2013)

El proceso de transferencia de calor y de masa inicia cuando un medio de deshidratación, generalmente una masa de aire caliente (con una velocidad, humedad y temperatura previamente definidas), entra en contacto con el material que se desea deshidratar. El calor se transfiere inicialmente a la superficie del material por convección y se mueve a través del mismo por conducción. Para deshidratadores que utilizan aire como medio de deshidratación la velocidad de transmisión de calor está dada por: (Chiquillo & Diaz, 2010)

$$Q = h_s A (T_g - T_{sup}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Q = velocidad de transmisión de calor.

h_s = 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 flujo de humedad dentro del material por una combinación de distintos mecanismos de transporte se debe a:

- El flujo capilar debido a gradientes presión de succión capilar. Difusión líquida por gradientes de concentración.
- Difusión de vapor causada por gradientes de presiones de vapor.
- Flujo viscoso consecuencia de gradientes totales de presión externos o altas temperaturas.

Otro mecanismo como la difusión térmica o superficial y el flujo debido a fuerzas gravitatorias tienen menor importancia en la deshidratación de alimentos. (Valverde, 2013).

3.2 Variables que afectan la deshidratación

Dentro del proceso de deshidratación con aire caliente, existen variables propias que determinan las condiciones del proceso y las características del producto final y condicionan la selección o diseño del sistema; estas pueden ser externas, si se refieren a las condiciones

del ambiente y del proceso, o internas si están dadas por las condiciones del producto.

3.2.1 Humedad relativa

Es la cantidad de vapor de agua que posee un volumen determinado de aire y dependiendo del valor medido de humedad relativa se sabrá si ese aire húmedo presente en el ambiente puede absorber o no, el agua que pierde la fruta en forma de vapor. Si existe una humedad relativa cerca al 0% significa que el aire está casi seco y puede absorber humedad; en cambio si la humedad relativa es cercana al 100%, se deduce que el aire está prácticamente saturado y por consiguiente no puede contener más vapor de agua.

3.2.2 Velocidad y flujo del aire

Es la velocidad lineal de aire en circulación sobre el sólido a secar. A mayor velocidad el tiempo de deshidratación es menor, pero el consumo de potencia de ventilación aumenta (Ratti, 2009).

El aire circulado dentro del deshidratador se usa para retirar la humedad evaporada del producto. Este aire se circula por dos métodos; circulación por convección natural y circulación forzada.

En la circulación por convección natural, el aire es movido por las diferencias de temperatura en las distintas partes del equipo, que promueve la convección térmica del aire. Este tipo de circulación es ideal para equipos a escala laboratorio o piloto.

En la circulación forzada, el flujo de aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el control del proceso de deshidratación. (Blanco & Segura, 2017).

La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en la deshidratación. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar puesto que la primera afecta en mayor grado la capa límite.

Para asegurar una deshidratación rápida y uniforme, es indispensable mantener una circulación de aire constante. La velocidad del aire influye dependiendo del espesor del material, el contenido de humedad inicial y la temperatura de bulbo seco inicial. Debido a lo anterior, es recomendable usar una baja velocidad de aire y un espesor adecuado del material, para que la superficie a secar, no se vea afectada y permita una deshidratación uniforme del producto.

En la práctica, la economía del proceso determina la velocidad del aire. (Valverde, 2013). El flujo de aire para el caso de la deshidratación directa puede circular en flujo paralelo, transversal o en lecho fluidizado.

Tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa, son incrementadas si el área de contacto entre el sólido y el aire es mayor. El deshidratado en flujo paralelo presenta menor área de contacto y por consiguiente menor velocidad de deshidratación, pero los consumos de potencia de ventilación, son menores que en los otros dos sistemas. Por el contrario, el flujo transversal o el fluidizado incrementan el área superficial y disminuyen el tiempo de deshidratación, pero a costo de un mayor consumo de potencia de ventilación (A.

D. Jiménez, 2014)

3.2.3 Temperatura de bulbo seco

Temperatura que tendría una mezcla aire-vapor de agua expuesta en forma ordinaria al bulbo seco del termómetro, esta variable determina las condiciones de entrada del aire húmedo al equipo y conociendo este valor, es posible determinar la temperatura de operación de la cámara de deshidratación.

3.2.4 Temperatura de bulbo húmedo

Temperatura que se alcanza al poner en contacto el bulbo del termómetro humedecido con una corriente de aire en condiciones estables. Entendiendo las condiciones de baja saturación que se requiere para deshidratar la fruta, esta temperatura permite relacionar la diferencia que hay entre ella y la de bulbo seco, y con esto es posible determinar la humedad relativa del aire y establecer si este aire humedecido puede captar o no, el vapor de agua que va perdiendo el producto en el proceso.

3.3 Tipos de deshidratadores

La diversidad de productos alimenticios ha introducido muchos tipos de deshidratadores para la industria alimentaria. (Mujumdar, 2014).

La clasificación de los equipos de deshidratación se basa generalmente en dos aspectos:

a. Características y propiedades físicas del producto húmedo: Permite seleccionar un grupo de deshidratadores para un estudio preliminar en un problema dado.

b. Procedimiento para transmitir calor al solido húmedo: Interesa industrialmente y muestra diferencia en el diseño y funcionamiento de los deshidratadores.

De acuerdo a este segundo aspecto se destacan los deshidratadores directos, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo, para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado, en los deshidratadores indirectos se elimina el líquido vaporizado transmitiendo calor al solido húmedo, por medio de la pared que lo contiene. (P.F. Maupoey, Grau, Sorolla, & Baviera, 2001)

En la figura 1, se presenta una clasificación de los diferentes tipos de deshidratadores conocidos comercialmente.

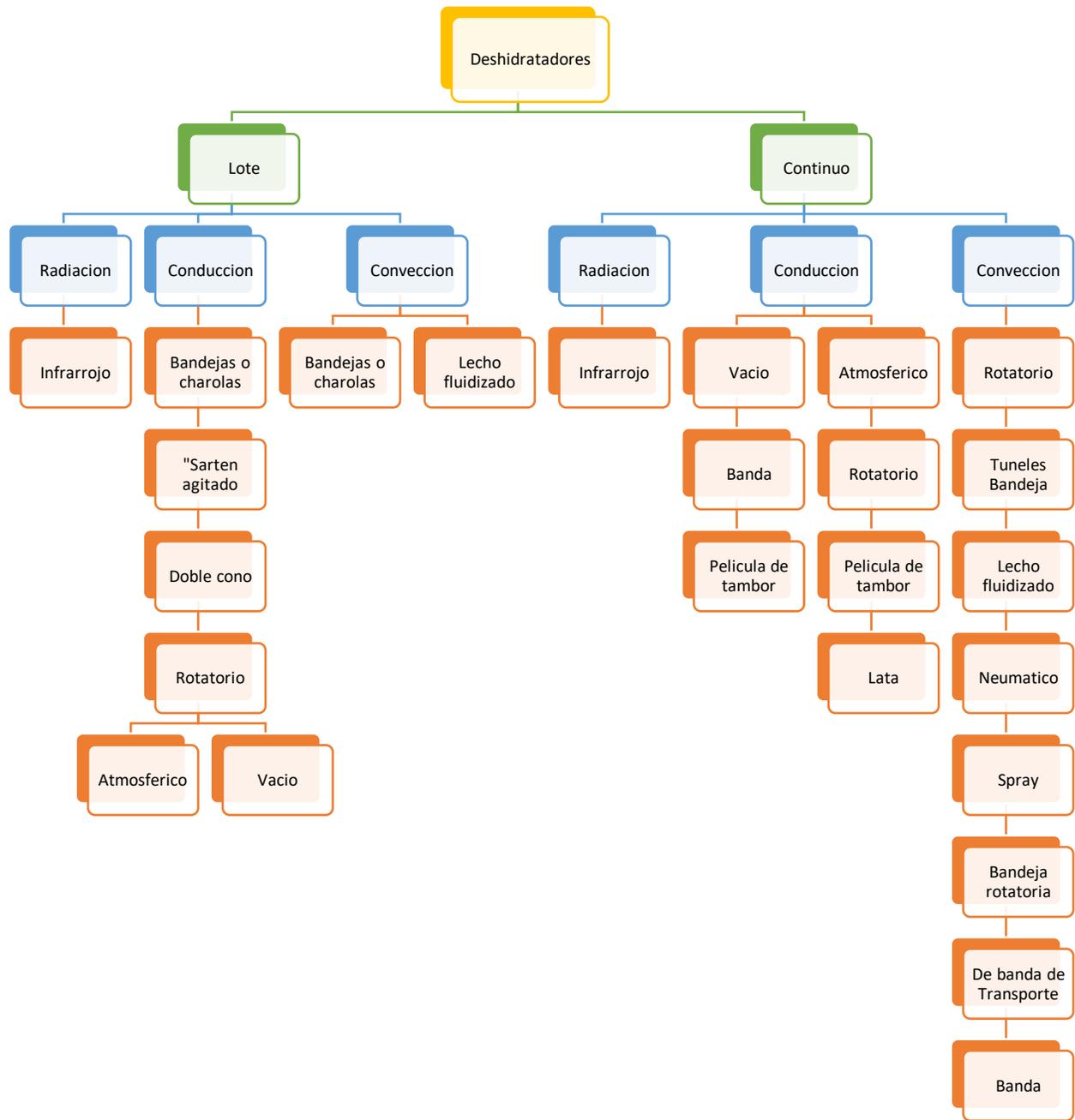


Figura 1. Clasificación y tipos de deshidratadores industriales.

Fuente: Tomado y modificado (Chiquillo & Diaz, 2010)

3.3.1 Deshidratador de horno o estufa

Consta de una cámara con dos secciones, una de deshidratación y otra para quemadores. Los tiempos de deshidratación son bastante largos debido a la gran cantidad de producto procesado por cada ciclo de deshidratación. El producto se ubica en la sección de deshidratación, mientras el aire caliente pasa a través de él (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996). En la figura 2, se muestra un esquema de este equipo.

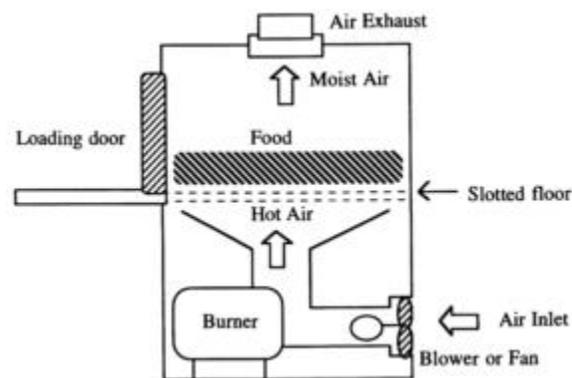


Figura 2. Deshidratador tipo horno.

Fuente: (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996)

3.3.2 Deshidratador de gabinete o bandeja

Está conformado por una cámara en la cual se sitúan unas bandejas que contienen el producto a deshidratar. El aire es impulsado por un ventilador, este pasa por un calentador y después a través de las charolas del material que se está secando. El deshidratador de bandejas es por lo general, el menos caro de construir, es fácil de mantener y bastante flexible, normalmente es usado en la deshidratación de hortalizas y frutas en operaciones a pequeña escala y escala de planta piloto (Cruz, 2014).

Los deshidratadores de bandejas son útiles para secar pequeñas cargas de productos valiosos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50kg/h de producto seco (Torre, 2016). En la figura 3 se ilustra una configuración de este equipo.

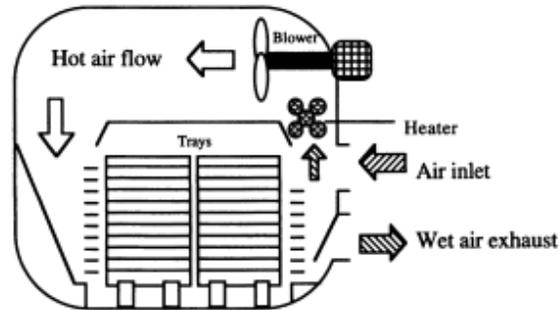


Figura 3. Deshidratador de bandeja.

Fuente:(Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996))

3.3.3 Deshidratador rotativo

Consiste en una carcasa cilíndrica que se encuentra ligeramente inclinada respecto a la horizontal. La alimentación húmeda se introduce por una abertura en la parte superior del deshidratador y esta se va desplazando a través de este agujero en virtud de la rotación, el efecto de cabeza y la pendiente de la carcasa. El producto seco es retirado por la parte inferior. La dirección del flujo de gas a través del cilindro con relación a los sólidos está dictada principalmente por las propiedades del material procesado. El flujo en paralelo se usa para materiales sensibles al calor incluso para una temperatura de entrada alta debido al enfriamiento rápido del gas durante la evaporación inicial de la humedad de la superficie, mientras que para otros materiales es deseable el flujo a contracorriente para aprovechar la mayor eficiencia térmica que se puede lograr de esta manera. En el primer caso, el flujo de

gas aumenta la tasa de flujo de sólidos, mientras que lo retarda en el segundo caso. (Mujumdar, 2014). En la figura 4 se encuentra una ilustración de este tipo de deshidratador.

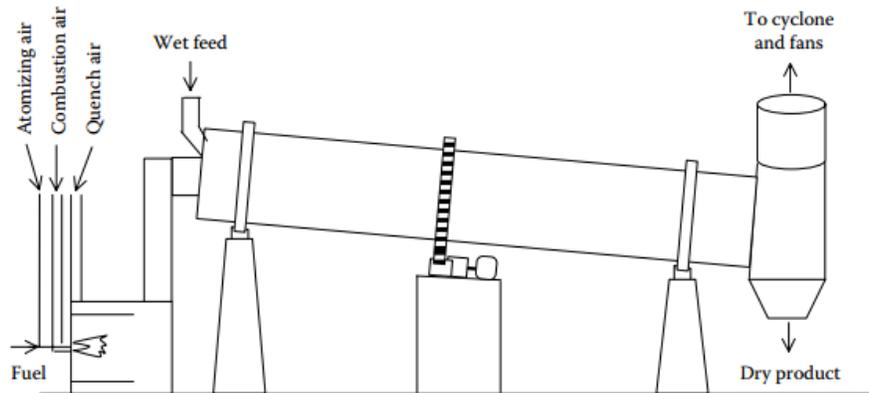


Figura 4. Deshidratador rotativo.

Fuente:(Mujumdar, 2014)

3.3.4 Deshidratador tipo túnel

Es un tipo de deshidratador que puede tener hasta 24 m de largo con una sección transversal cuadrada o rectangular de aproximadamente 2m x 2m, consiste en un gabinete equipado con rieles para mover las bandejas a lo largo de la cámara de deshidratación. Los ejemplos de flujo en paralelo y contracorriente se observan en la figura 5. Al igual que el deshidratador de gabinete, los deshidratadores de túnel tienen deshidratado no uniforme en diferentes lugares del túnel. Este tipo de deshidratador opera de forma semicontinuo permitiendo secar frutas y verduras por medio de un operador que carga las bandejas del material a secar y las ubica en el deshidratador. Luego, el deshidratado continúa automáticamente hasta la salida, donde el operador retira el producto seco. (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996). La Figura 6 es una representación de este equipo.

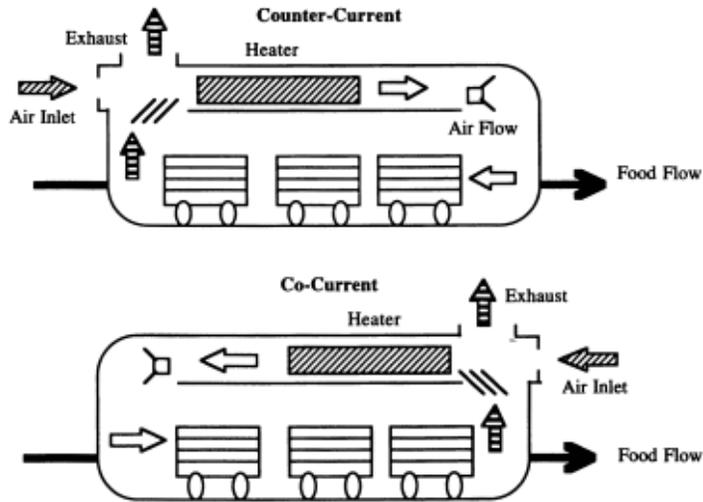


Figura 5. Deshidratador tipo túnel.

Fuente:(Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996)

3.3.5 Deshidratador de cinta transportadora

Son aparatos de gran superficie de deshidratación donde el producto se transporta a través del sistema con una correa. Posee una configuración que consiste en pasar el aire caliente por medio del cinturón y la capa superior del producto. Actualmente los deshidratadores de cinta están sustituyendo progresivamente a los de túnel en la deshidratación de frutas y verduras. Su funcionamiento prima para el deshidratado a gran escala de un solo producto a lo largo de su operación de recolección. Estos equipos son poco versátiles, es decir, no son adecuados para procesos en los que deba cambiar frecuentemente la materia prima y, por tanto, las condiciones de deshidratación. (Torre, 2016). En la figura 6 se observa un tipo de deshidratador de cinta transportadora.



Figura 6. Deshidratador de cinta transportadora.

Fuente: (Mujumdar, 2014)

3.3.6 Deshidratado por atomización

En este equipo la eliminación del agua de un alimento tiene lugar cuando el líquido se atomiza en el seno del aire caliente en la cámara de deshidratación. La distribución básica introduce las gotas de líquido en la corriente de aire caliente. Mientras las gotas de líquido son transportadas en la corriente de aire caliente, el agua se evapora y es arrastrada por el aire. La mayor parte de la deshidratación tiene lugar durante el periodo de velocidad constante y la etapa limitante es la transferencia de materia en la superficie de las gotas. Una vez alcanzada la humedad crítica, la estructura de la partícula es la causante de la disminución de velocidad de secado, siendo el parámetro limitante la difusión de la humedad en el interior de la partícula seca. Una vez secas, las partículas abandonan la cámara de deshidratación y se separan del aire mediante un ciclón. La humedad alcanzada suele ser inferior al 5%. (P. Singh & Heldman, 2009). La figura 7 ejemplifica de manera ilustrativa este equipo.

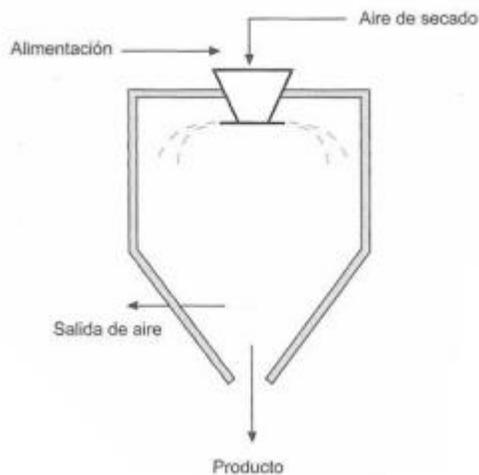


Figura 7. Deshidratado por atomización.

Fuente: (P. Singh & Heldman, 2009)

3.3.7 Deshidratado por lecho fluidizado

Los deshidratadores de lecho fluido son equipos de deshidratado rápido, que se basan en la alta tasa de transferencia de calor y masa entre el medio de calentamiento (aire caliente) y el material granular fluidizado. Deshidratan de manera eficiente y económica materiales alimenticios en forma granular, como granos, guisantes y otras partículas de alimentos. Los componentes básicos de un deshidratador de lecho fluidizado, son un lecho del material soportado en un plano perforado, a través del cual se pasa aire caliente, fluidificando y deshidratando el material. Un colector de ciclón y otro equipo de recolección de polvo instalado antes del ventilador de extracción centrífuga. El requisito básico para esta operación es la fluidización en aire de un lecho de material particulado, que se ve afectado por el tamaño, la forma y la densidad de las partículas. El tamaño medio de partícula para una operación eficiente es de 20 μm a 10 mm. Es deseable una distribución de tamaño de partícula

estrecha, ya que reduce el arrastre de las partículas más pequeñas. La mezcla rápida de los sólidos conduce a una operación casi isotérmica en toda la cámara y un mejor control del proceso. (G. D. Saravacos & Kostaropoulos, 2002). La figura 8 nos enseña un esquema del deshidratador de lecho fluidizado.

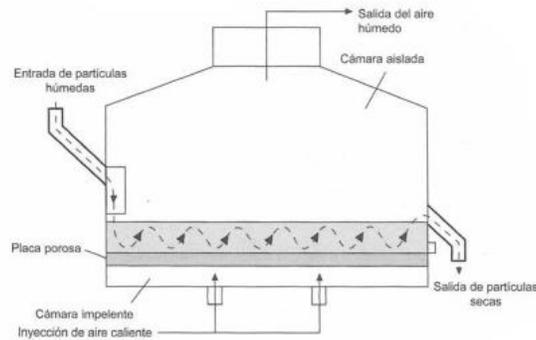


Figura 8. Deshidratado por lecho fluidizado.

Fuente: (P. Singh & Heldman, 2009)

3.4 Curva de secado

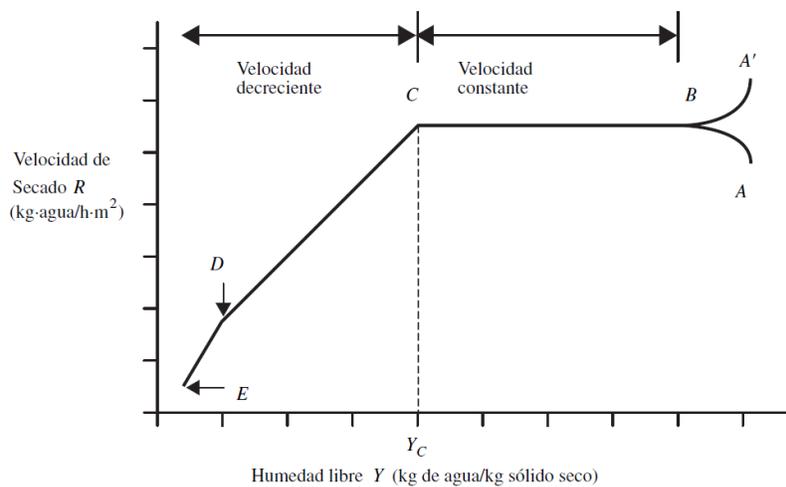


Figura 9. Curva de secado

Fuente: (A. Ibarz & Ribas, 2005)

El proceso de deshidratación de los materiales se puede describir como una serie de pasos en los que la velocidad de secado es un factor clave a estudiar y para ello se deben entender las fases que se generan en dicha velocidad con respecto a la humedad libre. En la figura 9 se muestra una curva de velocidad de secado típica para una condición de deshidratación constante. Los puntos A' y A representan la temperatura inicial del material caliente o frío, respectivamente (Geankoplis, 1998).

3.4.1 Velocidad constante

El periodo B a C de la curva, conocida como el período de tasa constante, representa la eliminación del agua no ligada del producto y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece, pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido temperatura, humedad y velocidad del aire. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del aire, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento (Valverde, 2013).

La humedad crítica se da en el punto mostrado Y_c también conocido como punto de saturación de la fibra del material, esto se da debido a que la humedad del sólido es inferior a la humedad crítica, por ello la difusión desde el interior del sólido no puede suministrar todo el líquido que se evapora en la superficie; es gracias a esto que la velocidad de evaporación empieza a disminuir; de igual forma debe considerarse que, debido a la remoción

de líquido, el material empieza a experimentar un fenómeno de encogimiento que incrementará en el transcurso del proceso. (A. Ibarz & Ribas).

En tanto la tasa de evaporación superficial, controle el proceso (período velocidad de secado constante), la tasa de secado constante R_c , se puede calcular mediante un balance de calor:

Calor latente de evaporación = Calor transferido

$$-\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = m * \lambda = h * A * (T_a - T_s) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$-\left(\frac{dw}{dt}\right)_c$ = Tasa de secado en la etapa de velocidad constante.

m = Masa del sólido.

λ = Calor latente de vaporización

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección.

A = Área expuesta a la deshidratación.

T_a = Temperatura en el seno del aire.

T_s = Temperatura de la superficie del sólido.

Siendo $R_c = -\left(\frac{dw}{dt}\right)_c$ y despejando:

$$R_c = \frac{h * A * (T_a - T_s)}{m * \lambda} \quad \text{Ecuación 3}$$

La temperatura de la superficie (T_s), es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_{bh}), mientras dura el período de secado constante.

El tiempo de secado en el periodo de secado constante t_c , se calcula integrando R_c , con respecto al tiempo:

$$\int_{w_0}^{w_c} dW = - \int_0^{t_c} R_c * dt \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

w_0 = Humedad inicial.

w_c = Humedad critica.

t_c = Tiempo de deshidratación en la etapa de velocidad constante.

$$t_c = \frac{(w_0 - w_c)}{R_c} \quad \text{Ecuación 5}$$

3.4.2 Velocidad decreciente

El punto crítico, como se muestra en la figura 9, divide el proceso en dos secciones velocidad constante y velocidad decreciente. En la sección de velocidad decreciente se pueden observar dos cambios de pendiente en la curva de secado, la primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen continuamente hasta que la superficie está seca completamente (punto D), mientras que la segunda etapa del período de velocidad de secado decreciente se inicia en el punto D, cuando la superficie está completamente seca, y el plano

de evaporación se traslada al interior del sólido. El calor requerido para eliminar la humedad es transferido a través del sólido hasta la superficie de evaporación y el vapor de agua producido se mueve a través del sólido en la corriente de aire que va hacia la superficie. A veces, no existen diferencias apreciables entre el primer y segundo período de velocidad decreciente. La cantidad de agua eliminada en este período puede ser baja, mientras que el tiempo requerido en la mayoría de los casos puede ser elevado. (A. Ibarz & Ribas).

La velocidad de secado en el período descendiente viene dada por:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_d = -K * (w - w_e) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\left(\frac{dw}{dt}\right)_d$ = Tasa de deshidratación en la etapa de velocidad decreciente.

K = Constante en función de la tasa de secado a velocidad constante.

w_e = Humedad de equilibrio.

$$K = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_c}{w_c - w_e} \quad \text{Ecuación 7}$$

Sustituyendo:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_d = -\frac{R_c * (w - w_e)}{w_c - w_e} \quad \text{Ecuación 8}$$

Si se dispone de los datos de humedad inicial (W_0), humedad crítica (W_c), humedad final (W_f) y R_c , el tiempo de secado total se puede calcular teóricamente:

$$t_t = t_c + t_d \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

t_t = Tiempo total de deshidratación.

t_d = Tiempo de deshidratación en la etapa de velocidad decreciente

El tiempo total, incluyendo el período de secado decreciente t_d , se calcula integrando:

$$\int_{w_c}^w \frac{(w_e - w_c)}{R_c * (w - w_e)} = \int_{t_c}^{t_t} dt \quad \text{Ecuación 10}$$

Reordenando y resolviendo, nos queda que:

$$t_t - t_c = \frac{(w_c - w_e)}{R_c} * \ln \frac{(w_c - w_e)}{(w - w_e)} \quad \text{Ecuación 11}$$

Sustituyendo:

$$t_t = \frac{(w_0 - w_c)}{R_c} + \frac{(w_c - w_e)}{R_c} * \ln \frac{(w_c - w_e)}{(w - w_e)} \quad \text{Ecuación 12}$$

3.5 Psicrometría

Es la rama de la física relacionada con la medición o determinación de las condiciones del aire atmosférico, el cual es una mezcla de aire seco y vapor de agua. También se puede denominar como “aquella parte de la ciencia que está en cierta forma íntimamente ligada a

las propiedades termodinámicas del aire húmedo”. Estas propiedades termodinámicas son de gran interés en la etapa de pos-cosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos. (Fermín & Erices, 2004)

Las propiedades del aire y el efecto de la humedad atmosférica sobre la fruta se pueden analizar gracias a la psicrometría. Para interpretar propiedades como el volumen específico húmedo, humedad relativa, humedad absoluta y temperatura de bulbo seco, se utiliza un diagrama psicrométrico. (Lozano & Ortiz, 2016)

3.5.1 Diagrama psicrométrico

Un proceso psicrométrico, es aquel en el cual el aire que inicialmente se encuentra a unas determinadas condiciones, sufre unos cambios con los cuales obtiene nuevas condiciones. (Félix, 2010). El diagrama psicrométrico estudia los valores de las propiedades del aire en conjunto. El empleo de la carta psicrométrica está generalizado a la industria en donde las condiciones del aire ambiental cambian, afectando o contribuyendo al proceso que se maneje y de acuerdo a la presión de trabajo.

Para calcular las diferentes propiedades del aire y condiciones de proceso, se escogió el programa de licencia libre CYTSoft Psychrometric Chart 2.2 Demo. Se pueden ingresar las variables de presión atmosférica, el rango de temperaturas y la humedad absoluta a trabajar. El programa elabora la carta psicrométrica cuando todas las especificaciones necesarias están incluidas, además se pueden ingresar en la calculadora que posee el programa diferentes

valores, como la temperatura de bulbo seco y húmedo, humedad relativa y absoluta, entre otros, para obtener otras condiciones. (Lozano & Ortiz, 2016).

Para simular las condiciones reales de trabajo en el deshidratador, la figura 10 muestra una imagen de la carta psicrométrica 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).

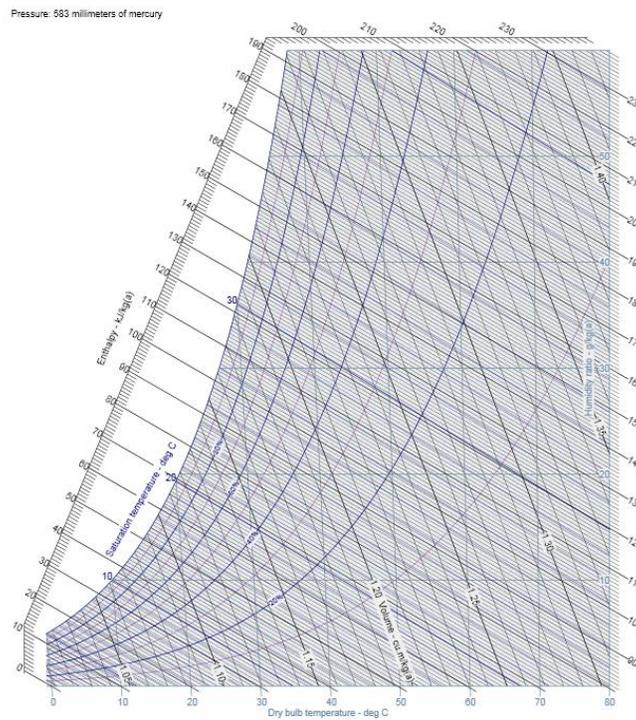


Figura 10. Diagrama Psicrométrico

Fuente: programa CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo

3.5.2 Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Las propiedades termodinámicas del aire húmedo que proporciona la carta psicrométrica son, la humedad relativa la cual se describe por la siguiente ecuación

$$H = 100 \frac{P_{\text{agua}}}{P_{\text{sat}}} = 100 \frac{Y_{\text{agua}}}{Y_{\text{sat}}}$$

En donde y_{agua} es la fracción molar del agua en la mezcla y y_{sat} la fracción molar del agua en una mezcla saturada a la misma temperatura (A. D. Jiménez, 2014). También se encuentran otras variables como la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, la presión de vapor, la entalpía y el volumen específico que pueden ser medidas en el aire húmedo haciendo uso del diagrama psicrométrico.

Si bien en la carta psicrométrica podemos encontrar todos estos parámetros que nos ayudan a definir el acondicionamiento del aire, los parámetros físicos medidos comúnmente son los de temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco y humedad relativa que se utilizaron en el proceso para el desarrollo de la curva de secado.

Las propiedades de volumen específico, entalpía, y presión de vapor se utilizaron para el desarrollo del balance de masa y energía como apoyo para el diseño del deshidratador.

3.6 Antecedentes

(Chiquillo & Diaz, 2010), desarrollaron el prototipo de una máquina de deshidratación para frutas tropicales; realizaron el diseño teniendo en cuenta previamente la densidad, espesor y carga por lote de las frutas (banano, piña y guayaba) a deshidratar, seguidamente plantearon un prototipo de deshidratador por aire caliente que utiliza la energía térmica proporcionada

por un banco de resistencias eléctricas, determinaron la disminución de la humedad extrayendo las bandejas cada 30 minutos.

Por otro lado, (Dagde, Nmegbu, & Jacob, 2014), estudiaron el modelado matemático de un deshidratador de bandejas discontinuo para la deshidratación de papas fritas por medio de una corriente de aire caliente. Para llevarlo a cabo hicieron uso de las ecuaciones de Rungekutta de cuarto orden, seguidamente las implementaron en un programa Visual Basic. Los resultados especifican que la temperatura del aire cae inicialmente cuando ingresa al deshidratador debido al alto contenido de humedad en la papa, pero luego comienza a aumentar y estabilizarse.

La tesis de (Lozano & Ortiz, 2016), está basada en el diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snacks para ecovital orgánico, donde estudiaron las diferentes propiedades físico-químicas de la fresa (*fragaria ananassa*) y las condiciones de operación como la temperatura, velocidad del aire y el tiempo de secado. Plantearon el balance de masa y de energía con y sin recirculación de aire para realizar el diseño del deshidratador, realizaron pruebas y encontraron que las mejores condiciones para deshidratar la fresa era una temperatura de 55°C, una velocidad de aire de 8m/s y una humedad relativa dentro del equipo de 80%, con lo cual aseguraron una humedad de la fruta entre 13 y 15%.

También el artículo presentado por (Valencia, Rodríguez, & Giraldo, 2011) muestra que se deshidrataron láminas de manzana por el método convectivo, convectivo-vacío, convectivo-microondas y liofilización para determinar la cinética que ofreciera mejor control a la oxidación. Hallaron que las láminas que se deshidrataron a 40°C necesitaron aproximadamente 180 minutos hasta peso constante y las deshidratadas a 60°C requirieron aproximadamente 60 minutos hasta peso constante.

Finalmente en el artículo de (Mahecha & Parra-Coronado, 2011) se diseñó un prototipo funcional de un deshidratador dinámico en el cual para su evaluación se deshidrato pulpa de mango (*Mangifera indica L.*) usando tres temperaturas en el aire de deshidratación (50, 60 y 70 °C) con tres velocidades del aire en el interior del deshidratador (1,6; 2,2 y 3,4 m/s) y combustión de gas propano para calentar el aire. El prototipo permitió deshidratar pulpa de fruta fluida con un contenido de humedad inicial en base seca de 4,26 hasta un contenido de humedad final en base seca de 0,11 con un tiempo de secado de 8 h (temperatura y velocidad del aire de 70 °C y 3,4 m/s respectivamente), obteniendo láminas de pulpa deshidratada con un espesor de $1,5 \pm 0,5$ mm y una actividad de agua (a_w) de 0,60 que lo hace estable con bajo contenido de agua y con características muy similares al producto fresco.

4. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

La deshidratación permite la preservación de los alimentos por un tiempo más prolongado, al igual logra disminuir su peso e incluso su volumen y conjunto esto ello permite mayor cantidad de almacenamiento reduciendo así costos de transporte (Mujumdar, 2014).

Es importantes tener en cuenta la preservación de la estructura celular inicial del material que se está deshidratando, en la mayoría de los casos, es una función del proceso aplicado al alimento. En la eliminación de agua de productos que contienen alta humedad, como frutas y verduras, es importante recordar que las membranas celulares pueden o no haber sido dañadas durante el procesamiento (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996).

La deshidratación de los productos alimenticios no solo afecta el contenido de agua del producto, sino que también altera otras propiedades físicas, biológicas y químicas, como la actividad enzimática, el deterioro microbiano, el crujiente, la viscosidad, la dureza, el aroma, el sabor, la palatabilidad de los alimentos, la velocidad del aire que pasa sobre el alimento, la temperatura y la cantidad de agua presente en el mismo controlan la capacidad de absorción del aire. Por otro lado, ciertas variables como las condiciones de procesamiento, la naturaleza del alimento, y el diseño del equipo controlan la velocidad de secado (Treybal & Rodríguez, 1980).

Uno de los objetivos en el proceso de deshidratación es que el alimento no pierda su sabor característico y sus cualidades nutricionales, para lo cual se deben establecer condiciones adecuadas que reduzcan al mínimo estos cambios, por lo cual en el proceso no se utilizan

aditivos, colorantes, conservantes ni azúcar adicional, lo que garantiza que sea un producto natural y saludable (Jangam, Law, & Mujumdar, 2011).

4.1 Distribución del agua en los alimentos.

El contenido de agua o de humedad de un alimento se refiere, en general a toda el agua de manera global. Esta agua se encuentra distribuida de forma heterogénea en el producto, la cual se conserva aunque el producto sea procesado (Arevalo, 2017).

Debido a estas razones en los alimentos existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua; es decir, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas. Esto se puede explicar por los dos términos en los que se divide las fracciones de agua que contiene un alimento.

Agua ligada o no congelable, es la proporción de agua en un alimento que no congela a -20°C , esta agua no está libre para actuar como solvente con azúcares y sales; no presenta presión de vapor, posee densidad mayor que la del agua libre y no puede llegar a afectar en las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas del producto.

Agua libre o congelable, es la proporción de agua de un alimento que se congela primero, se volatiliza rápidamente, se pierde en el calentamiento, es la única disponible para el crecimiento de microorganismos o para intervenir en las transformaciones hidrolíticas, químicas, enzimáticas, entre otras. Adicional es la responsable de la actividad del agua (Dergal, 2006).

La relación de concentraciones entre agua libre y agua ligada, se incrementa en la medida que el producto contiene más agua, mientras que, en los alimentos deshidratados, dicha relación se reduce considerablemente. Algunos investigadores consideran que el agua ligada está fuertemente unida al alimento por medio de puentes hidrogeno, pero otros establecen que dicha agua solo esta físicamente atrapada en una matriz muy viscosa que no permite su movilidad y difusión y por tanto no está disponible (Damodaran & Fennema, 2010).

4.1.1 Actividad del agua

La actividad del agua (A_w), es la relación entre la presión del vapor del aire alrededor del alimento (P_s) y la presión de vapor del agua pura (P_w) a una temperatura determinada (Rockland & Nishi, 2006):

$$A_w = \frac{P_s}{P_w} \quad \text{Ecuación 13}$$

Es un parámetro junto con el pH, temperatura y cantidad de oxígeno presente en el medio, que son muy importante en la conservación de alimentos pues determinan el crecimiento microbiano, las propiedades organolépticas, el valor nutricional y su tiempo de conservación. Esta es una propiedad intrínseca de cada alimento y únicamente se relaciona con el contenido de humedad global de dicho alimento por medio de las llamadas curvas o isothermas de adsorción y desorción. Por esta razón no se debe confundir la actividad del agua con la cantidad total de agua, ya que esta representa la cantidad de agua libre o disponible para el crecimiento de microorganismos.

En los alimentos entre mayor sea la actividad del agua y se encuentre más cercana a 1, serán más inestables y necesitan de una conservación en refrigeración si se desean conservar por mayor tiempo, por el contrario, cuando los alimentos presentan una actividad del agua baja son estables a temperatura ambiente y no requieren refrigeración ya que el crecimiento microbiano es lento.

Según la actividad del agua (A_w) los alimentos se pueden clasificar:

A_w 0.97 o superior, aquí encontramos alimentos como carnes, frutas frescas y enlatadas, jugos, verduras, hortalizas, leche y huevos.

A_w entre 0.97 a 0.93; alimentos como leche condensada, carnes a las que se les han agregado sales, embutidos pre cocidos, quesos y panes.

A_w entre 0.93 y 0.60, alimentos como confituras, mermeladas, miel, cereales, harinas, frutas secas, extractos de carne, quesos muy madurados.

A_w Inferior a 0.60, dulces, chocolate, pastas, galletas, papas fritas, huevo en polvo y leche en polvo.

En la deshidratación trata de la extracción del agua del producto hacia la solución, disminuyendo A_w del producto a niveles que tienden a detener el crecimiento de microorganismos y a prolongar y preservar el alimento. Cuando una célula se coloca en una solución de bajo A_w , ella se deshidrata y su crecimiento se inhibe. Según los principios de la termodinámica, A_w es la fuerza principal detrás de la deshidratación, lo que explica por qué A_w y no el contenido de humedad influencia el crecimiento microbiano (Valdés Marín, 2008). Las hortalizas deshidratadas a 7% de humedad tienen un valor aproximado de 0,35 donde no hay actividad de microorganismos y casi todas las reacciones de deterioro están

minimizadas. Las frutas desecadas a 25% de humedad tienen un valor aproximado de 0,79 de A_w donde sólo pueden proliferar mohos y más dificultosamente levaduras (a menos que exista una dilución en superficie) (Gascón, Muravnick, & Andreuccetti, 2013).

4.2 Pretratamiento para vegetales y frutas

Los pretratamientos son aquellos procesos físicos o químicos anteriores al deshidratado, que se le aplican al material con el fin de evitar o minimizar el deterioro del mismo durante la deshidratación, así como mejorar la calidad y conservación del producto en sus propiedades organolépticas (color, sabor, aroma, olor), nutricional y química al final. 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). Los pretratamientos que existen son (Echeverriarza, 2005):

Blanqueado el cual consiste en sumergir el producto en agua a una temperatura de 90 a 95°C por un tiempo variable, esto depende del tamaño y estado de madurez del producto. Este proceso ayuda a la inactivación de las enzimas, ablandamiento del producto, a la eliminación parcial del contenido de agua de los tejidos, fijación del color natural, sabor y olor característico. También es conocido como escaldado y no se suele utilizar en el deshidratado de frutas, en especial si se va a secar en trozos, pues afecta mucho al sabor del mismo. Es ampliamente utilizado en deshidratación de hortalizas y se puede realizar con agua hirviendo o con vapor caliente.

Sulfitado su procedimiento se lleva a cabo por medio de la adicción de sulfitos que inhiben las reacciones de oscurecimiento o pardeamiento por oxidación de los productos a

deshidratar, actuando sobre los azúcares. La forma más usual de realizarlo es mediante la inmersión del producto en una solución de 5 a 12 gramos de metabisulfito de sodio o cualquier tipo de sulfito, por litro de agua a temperatura ambiente, por tiempo de 5 a 10 minutos para fruta cortada en trozos o rebanadas y de 15 minutos la cortada por mitades. Recomendable realizar este procedimiento en recipientes no corrosivos, como acero inoxidable o vidrio.

Tratamiento con ácidos orgánicos este método se emplea seguidamente en el deshidratado de frutas para disminuir el oscurecimiento o pardeamiento por oxidación y la pérdida de vitaminas A y C. El pardeamiento es un efecto indeseable que se presenta muy frecuentemente en frutas como manzanas, duraznos, peras, albaricoques y bananas, a causa de reacción enzimática. Para evitarlo, se sumerge la fruta recién pelada a un baño en una solución de ácido con agua durante 2 a 3 minutos.

Los ácidos más utilizados son el ascórbico o vitamina C y el cítrico; se puede preparar a solución en la proporción 1,5 a 2 g/litro de agua y 6 g/litro de agua, respectivamente. Al igual se puede preparar una solución con 80 a 100 ml de zumo de limón por litro de agua y sumergir el producto por tiempo anteriormente enunciado.

Bicarbonato de sodio estabiliza y ayuda a mantener la clorofila, haciéndolas más resistentes a la acción de los rayos solares. También produce un ablandamiento de las capas exteriores del producto, facilitando la salida del agua durante la deshidratación y eventualmente evitando el endurecimiento de la capa exterior. Este tratamiento se utiliza para el deshidratado de verduras en especial hortalizas y legumbres de color verde. Se puede aplicar preparando una solución disolvente de 30 g de bicarbonato de sodio más 3 g de sal común por cada litro de agua.

Agrietado este es un pretratamiento utilizado en la deshidratación de frutas que no se pelan antes de secarlas, como ciruelas, uvas e higos, con el fin de remover su capa protectora y lograr un ligero agrieta en la piel, facilitando de esta manera la eliminación de humedad de la fruta en la deshidratación.

Se realiza sumergiendo la fruta en una solución a 80°C de hidróxido de sodio a razón de 10 g / litro de agua, por un tiempo de 5 a 10 segundos, seguidamente se lava la fruta con agua y luego se neutraliza durante 30 segundos en una solución de 2 g de ácido cítrico/ litro de agua.

Salado y almibarado, el salado hace referencia a la adición de cloruro de sodio (sal común). El almibarado es la adición de azúcar común (sacarosa, glucosa, miel), estos dos procedimientos se llevan a cabo antes del deshidratado para acentuar el sabor original y disminuir la actividad de agua asegurando una mejor conservación del producto final.

4.3 Deshidratación de frutas

Para la deshidratación con aire caliente se debe tener en cuenta varios factores que controlan la capacidad de absorción del aire y la velocidad de secado. Para el aire se toma en cuenta la velocidad con la que pasa el aire sobre la fruta, la temperatura y la cantidad de agua presente en el mismo y para la velocidad del secado se toma en cuenta las condiciones de procesamiento, la naturaleza de las frutas y el diseño del equipo.

Para el proceso de deshidratación de frutas es necesario tener ciertas recomendaciones a fin de obtener buenos resultados, las rodajas deben tener un grosor muy similar entre sí, porque de no ser así los trozos menos gruesos se secarán mucho más de lo necesario y como

consecuencia de ello podrían perder nutrientes y el producto final no sería homogéneo. Los bordes entre rodaja y rodaja no deben estar demasiado juntos para evitar que las rodajas no se peguen entre sí y garantizar un flujo fácil del aire. Adicional se debe tener en cuenta el estado de maduración de la fruta, debido a que según su estado cambia factores como la humedad y °Brix.

4.3.1 Durazno (*Prunus pérsica*)

El durazno (*Prunus pérsica*), también llamado melocotonero, es una de las especies frutales caducifolias (plantas que pierden sus hojas en ciertas épocas del año, dado a su origen subtropical) más cultivadas en las zonas templadas del mundo. Su fruto presenta buenas características nutritivas, lo que lo hace un alimento saludable con importante uso agroindustrial en la elaboración de conservas, pulpa, néctar, mermelada y deshidratados (Ana Cruz Morillo Coronado, 2014).

En la tabla 1 se observa la composición nutricional del durazno producido en Colombia.

Tabla 1. Composición nutricional del durazno producido en Colombia.

Durazno (<i>Prunus pérsica</i>)			
Calorías	39.0 kcal	Vitamina A (RAE)	16 mcg
Agua	88.87 g	Vitamina E	0.73 mg
Hidratos de carbono	9.54 g	Potasio	190 mg
Proteínas	0.91 g	Zinc	0.17mg
Grasa total	0.25 g	Fluoruro	4 mcg
Ceniza	0.43 g	Sodio	0 mg
Vitamina C	0.33 mg	Cobre	0.068 mg
Hierro	0.01 mg	Manganeso	0.061 mg
Fosforo	0.36 mg	Vitamina C	6.6 mg
Azúcares totales	8.39 g	Vitamina B5	0.153 mg
Vitamina B1	0.024 mg	Vitamina B6	0.025 mg

Fuente: (Vega, 2005)

4.3.2 Producción de durazno en Colombia

La producción agronómica de durazno en Colombia se concentra en los departamentos andinos de Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander, en la tabla 2 se observan los datos de área, producción, rendimiento y variedades cultivadas en estos departamentos (Pinzón, Cruz, & Fischer, 2014). 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 Cácuta 210,5 ha y en el municipio de Silos 170,8 ha. La variedad Jarillo y Gran Jarillo de bajo requerimiento de frío es de origen venezolano y es sembrada en el departamento de Norte de Santander (Quevedo-García, Darghan, & Fischer, 2017).

Tabla 2. Variedades de cultivo de durazno en algunas regiones de Colombia

Departamento	Área (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha-1)	Variedades cultivadas
Boyacá	833	12.009	14,4	Dorado, Diamante, Rubidoux, Rey negro
Cundinamarca	167	2.028	12,11	Dorado y Diamante
Norte de Santander	463	5.395	11,6	Jarillo y Gran jarillo
Santander	20	374	18,7	Jarillo y Gran jarillo

4.3.3 Variedades del durazno en Colombia

Las variedades mostradas en la tabla 3 se dividen en tres grupos dependiendo de la fecha de cosecha, estos grupos son los de cosecha rápida, media y tardía. En la mayor parte de los cultivos, la fecha de cosecha se determina por cambios en el color de fondo de la piel, de

verde a amarillo. Se utiliza una guía de colores para determinar la madurez de cada cultivar. Se reconocen tres grados de madurez en la cosecha. 1) Madura-US (Madurez Mínima); 2) Madura y 3) Madurada en el árbol (Casaca, 2005).

Las variedades diamante y dorado son de cosecha rápida, Rey Negro es de cosecha intermedia y variedades como Rubidoux y Gran Jarillo son de cosecha tardía. Con un buen manejo agronómico y adecuada oferta agroecológica, se pueden ofrecer, tanto para consumo en fresco o como agroindustria para todo el año, Colombia es favorecida para la producción de este fruto por su ubicación geográfica en el trópico y diversidad de microclimas que presenta.

Tabla 3. Características del fruto según su variedad

Variedad	Características del fruto
Dorado	Piel amarilla con ligera pigmentación roja, pulpa amarilla con coloración rojiza al rededor del hueso. Forma redondeada, peso promedio de 150g, consumo en fresco o agroindustria.
Diamante	Piel amarilla con ligera pigmentación rojiza, pulpa amarilla oro, de forma redondeada; sin embargo, la parte distal termina ligeramente puntiaguda. Peso promedio 100g.
Rubidoux	Piel amarilla con tonalidades rojizas fuertes, pulpa amarilla con coloración rojiza al rededor del hueso. Forma ligeramente redondeada y de tamaño grande, con peso promedio de 150g. Resistente al manipuleo pos cosecha.
Rey negro	Piel amarilla clara con manchas rojas opacas, pulpa blanca con coloración rojiza alrededor del hueso, de sabor dulce. Forma ovalada con presencia de pezón muy pronunciado y peso promedio de 160g.
Gran Jarillo	Piel rojiza con tonalidades amarillas, pulpa amarilla con coloración rojiza alrededor del hueso. Forma ligeramente redondeada y de tamaño grande, con peso aproximado de 150g. Presenta buena resistencia a la manipulación pos cosecha. Este durazno proveniente de Venezuela.

Fuente: Tomada y modificada de (Pinzón et al., 2014).

En este documento se decidió trabajar con el durazno 'Gran Jarillo' para potencializar y aprovechar el recurso con el que se cuenta en Pamplona, Norte de Santander, lugar en donde se va a realizar la investigación.

5. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN MULTICRITERIO

5.1 Selección del equipo de deshidratación

Se desarrolló por medio del método Electra, técnica de decisión multicriterio que permite resolver problemas de decisión complejos. En este caso es útil para la selección del tipo de deshidratador más idóneo en las condiciones de diseño y operación a trabajar, para ello se compararon cuatro posibles alternativas descritas a continuación.

5.1.1 Alternativa 1: Deshidratador de horno o estufas

El equipo de deshidratación con horno de aire caliente es adecuado para deshidratar materia prima en el campo de productos: farmacéuticos, químicos, alimentos, agricultura subdiaria, productos acuáticos, industria de la iluminación e industria de materiales pesados. Alguno de los productos son usados para producir medicina tradicional, extractos herbales, tabletas, gránulos, polvo, empaque de botellas, pigmentos, vegetales deshidratados, frutas secas, resina plástica, elemento electrónicos y barniz de hornear. Ver figura 11.

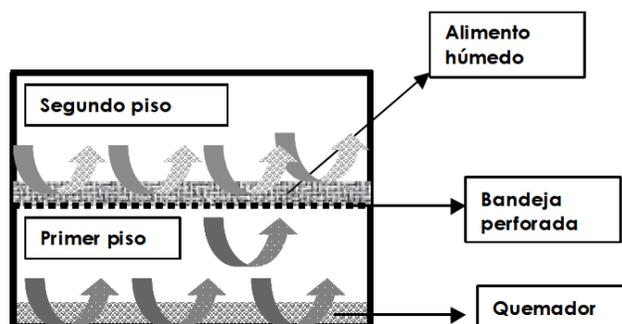


Figura 11. Deshidratador de horno o estufa

Fuente:(Pedro Fito Maupoey, Grau, Barat Baviera, & Albors Sorolla, 2016)

Tabla 4. Ventajas y desventajas del deshidratador de horno.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">✓ Deshidratación homogénea del producto✓ Control de temperatura eficiente que reduce las pérdidas durante el proceso✓ Menor consumo de combustible ya que se controla la temperatura dentro de la cámara realizando un control directamente sobre el quemador✓ Campo de aplicación amplio para diversas materias primas, siendo un equipo integral✓ Ahorro en costos de Operación por su diseño, mayor eficiencia	<ul style="list-style-type: none">✓ un mayor costo de instalaciones y de producción principalmente por los combustibles

5.1.2 Alternativa 2: Deshidratador de bandejas

Se conoce como deshidratador de anaqueles, de gabinete o de compartimientos, el material que puede ser un sólido en forma de terrenos o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo y el resto de aire es recirculado (Geankoplis, 1998), como se observa en la figura 12.

Cuando las características del material y su manejo lo permiten, se utilizan bandejas perforadas en las que el aire circula a través de la capa de sólidos, con lo que se consigue aumentar las superficies de sólido expuesta a la acción del aire y disminuyendo consiguientemente la duración del ciclo de deshidratación.

Los rendimientos térmicos de este tipo de deshidratadores suelen estar comprendidos entre el 20 y el 50%, pudiendo ser más bajos. Los deshidratadores de bandejas son útiles para deshidratar pequeñas cargas de productos valiosos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50 Kg/h de producto seco.

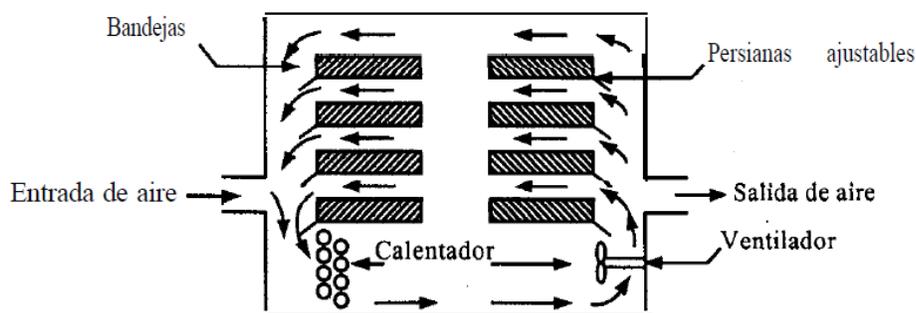


Figura 12. Deshidratador de bandejas

Fuente: (Geankoplis, 1998)

Tabla 5. Ventajas y desventajas del deshidratador de bandejas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Adaptable a grandes y pequeñas cantidades de deshidratación ✓ Facilidad de operación ✓ Mantenimiento sencillo ✓ Facilidad de Diseño y construcción ✓ Facilidad de evacuación del producto ✓ Cada lote de material se seca separadamente ✓ Pueden funcionar en régimen semicontínuo 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disminución de uniformidad en la deshidratación ✓ Son utilizados solamente en casos de pequeñas producciones ✓ Alto costo de la mano de obra al operarlo

5.1.3 Alternativa 3: deshidratador de túnel

Los deshidratadores de túnel son esencialmente una extensión de los deshidratadores de bandeja o gabinete, con varios camiones moviéndose lentamente en un túnel largo, mientras entran en contacto con aire caliente en paralelo, contracorriente o flujo combinado, como se

observa en la figura 13. El aire de deshidratación es movido por ventiladores mecánicos y calentado por intercambiadores de calor, que funcionan con vapor a una presión de aproximadamente de 7 bares. Se practica la recirculación parcial del aire alrededor del 50% del aire total, como en otros deshidratadores convectivos. Un tiempo de secado típico es de aproximadamente 6 horas. Son adecuados para la deshidratación económica de frutas y verduras, cerca de las granjas de producción, dado que la producción de la mayoría de las frutas y verduras es estacional (G. D. Saravacos & Kostaropoulos, 2002).

En este tipo de deshidratadores la humedad y la temperatura cambian continuamente, como consecuencia el periodo de velocidad constante del secado de los materiales no aparece como constante porque decrece a medida que la temperatura disminuye, por tal razón las curvas de velocidad de secado no se aplican a los procesos de deshidratación continua (Perry, Green, & Maloney, 2001).

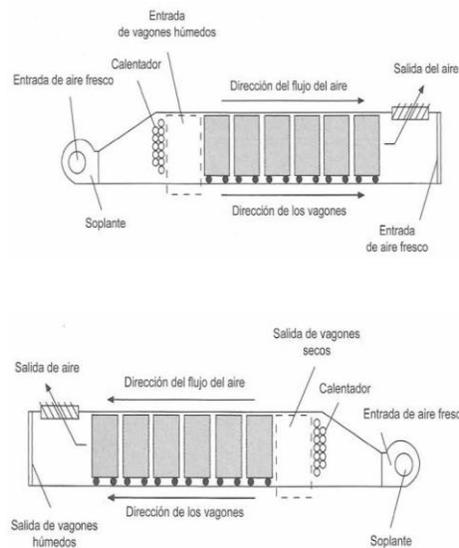


Figura 13. Deshidratador de túnel.

Fuente: (R. P. Singh, Heldman, Bacaicoa, & Labiano, 1997)

Tabla 6. Ventajas y desventajas del deshidratador de túnel

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deshidratan grandes cantidades de producto en un tiempo relativamente corto (5-6 horas). ✓ Son energéticamente eficaces ✓ Requieren menos mano de obra ✓ Proporcionan producto en mayor cantidad ✓ Son construidos con materiales de bajo costo ✓ Tienen la flexibilidad de diversas combinaciones en el flujo de las corrientes de aire ✓ Permite escalonamiento de temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere una inversión alta para los dispositivos automáticos de alimentación y descarga ✓ Solo funciona a nivel industrial, no permite deshidratar pequeñas cantidades de materia prima

5.1.4 Alternativa 4: deshidratador de lecho fluidizado

La fluidización es uno de los métodos más utilizados para producir contacto entre sólidos y fluidos como se observa en la figura 14, el cual se basa en el principio de suspensión de partículas, donde se hace pasar un flujo ascendente de fluido a través de un lecho de sólidos. Cada partícula es rodeada por el medio fluidizante (gas o líquido), lo cual favorece los mecanismos de transferencia y la velocidad del fluido debe ser tal que los sólidos “floten” en él.

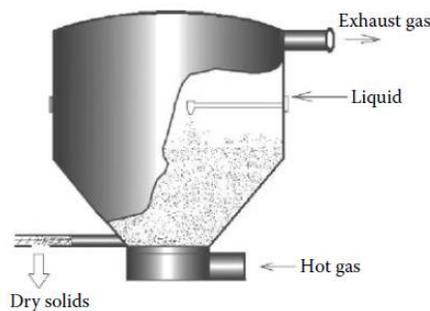


Figura 14. Fases de un lecho fluidizado en funcionamiento

Fuente: (Mujumdar, 2014)

El tamaño de las partículas sólidas que se pueden fluidificar varía considerablemente, desde menos de 1 m hasta 6 cm. Se ha concluido que las partículas cuando varían entre los 150 y 10 m son las que dan por resultado una fluidificación más uniforme. La velocidad ascendente varía entre 0.15 m/s y 6 m/s. Esta velocidad se basa en un flujo a través de un recipiente vacío y se conoce como velocidad superficial (Arellano, 2012).

Tabla 7. Ventajas y desventajas del deshidratador de lecho fluidizado

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ operación continua, automáticamente controlada y a gran escala, facilitando el manejo de la alimentación y del producto. ✓ El intercambio calorífico y de masa entre el gas y las partículas es rápido, evitando así un sobrecalentamiento. ✓ No existen piezas móviles, lo cual significa entre otras cosas, un bajo mantenimiento. ✓ Control fácil y seguro del proceso de deshidratación. ✓ El manejo de las partículas es gentil comparado con otros tipos de deshidratadores. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El material que está siendo deshidratado tiene que fluidizarse y algunos de los productos se encuentran muy mojados para fluidizar correctamente. ✓ Si el producto tiene una distribución de tamaño muy amplia, de tal manera que la velocidad del fluido suficiente para fluidizar las partículas grandes pudiendo así representar pérdidas de pequeñas partículas del lecho.

5.2 Análisis de alternativas

Con el propósito de analizar las alternativas propuestas se seleccionan factores relevantes de comparación de las ventajas y desventajas de las alternativas seleccionadas, estos se denominan factores de decisión y se muestran a continuación en la tabla 8.

Tabla 8. Factores de decisión en el método de Electra

Factor	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Control de proceso	Cuenta con un tablero de control lo cual hace sencillo su manejo y bajo costo, adicional cuenta con una perilla para regular la temperatura.	Sencillo es un proceso por lotes y sus datos los arroja a un computador siendo este adicionalmente económico.	Su control es factible dado que cuenta con un tablero de control aunque tiene un alto costo.	Es controlado automáticamente ya que es un sistema continuo, siendo este de alto costo.
Costo de mantenimiento	Bajo, es rápido de realizarlo y sus partes son fácilmente desarmables.	Bajo, sus partes son grandes y sencillas de observar.	Alto puesto que es mucho más grande.	Bajo, puesto que el equipo no tiene piezas móviles y la revisión más importante es externa.
Costo de consumo energético	Bajo consumo energético, cuenta con un control sobre el quemador lo cual ayuda al ahorro energético.	Es alto dado que la mayoría de los procesos son extensos y el equipo se mantiene encendido todo el proceso.	Alto, los procesos al ser un proceso semicontinuo es extenso adicional no se puede apagar el ventilador.	Bajo, a transferencia de calor y masa se logra rápidamente, requiriendo poco tiempo de secado.
Costo del equipo	Medio	Bajo, las partes que lo componen son económicas al igual que su sistema de control.	Alto por su diseño y sistema de control.	Alto debido al material de construcción y los equipos auxiliares.
Limpieza	Sencilla ya que es un sistema discontinuo y las bandejas son fáciles de limpiar.	Sencillo las bandejas se pueden retirar y lavar fácilmente.	Es minuciosa debido a que cuenta con varias carretillas y es primordial no dejarlas con ningún residuo posible.	Sencilla pero se debe prevenir de que no quede materia prima dentro del equipo.

Eficiencia	Buena eficiencia por su diseño, material de construcción y se pueden trabajar con diversas materias primas.	Buena eficiencia cuando son pequeñas cantidades de material a deshidratar.	En comparación con los otros equipos ofrece una muy buena eficiencia y la oportunidad de trabajar una mayor cantidad de materia prima.	Alta eficiencia en el proceso de contacto entre el sólido y el fluido.
-------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------

5.3 Aplicación del método de Electra.

Una vez definidos los factores de decisión se debe realizar una ponderación como se muestra en la tabla 9, posteriormente se elaboró la matriz de análisis de importancia, donde se da una ponderación a cada alternativa dependiendo del factor, ver tabla 10.

Tabla 9. Ponderación del vector peso

Factor	Ponderación
Control de proceso	0,15
Costo de mantenimiento	0,1
Costo de consumo energético	0,2
Costo del equipo	0,2
Limpieza	0,15
Eficiencia	0,2

Tabla 10. Análisis de importancia

Deshidratadores/ criterio	Control del proceso	Costo de mantenimiento	Costo de consumo energético	Costo del equipo	Limpieza	Eficiencia
Alternativa 1	6	6	5	6	9	5
Alternativa 2	7	6	4	8	9	6
Alternativa 3	4	3	3	3	6	8
Alternativa 4	4	5	5	2	7	9

Siguiendo los parámetros del método se elabora la matriz de concordancia y discordancia con base en el peso y la desviación de los valores, como se aprecia en las tablas 11 y 12.

Tabla 11. Matriz de concordancia

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	-	0,20	0,80	0,60
Alternativa 2	0,55	-	0,80	0,60
Alternativa 3	0,20	0,20	-	0,00
Alternativa 4	0,20	0,40	0,65	-

Tabla 12. Matriz de discordancia

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	-	2	3	4
Alternativa 2	1	-	2	3
Alternativa 3	3	5	-	2
Alternativa 4	4	6	1	-

Finalmente 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

	Dominancia filas	Dominancia Columnas	Diferencia de dominancias	Priorización
Alternativa 1	A3	A2	0	2
Alternativa 2	A1,A3, A4	0	3	1
Alternativa 3	0	A1,A2,A4	-3	4
Alternativa 4	A3	A2	0	2

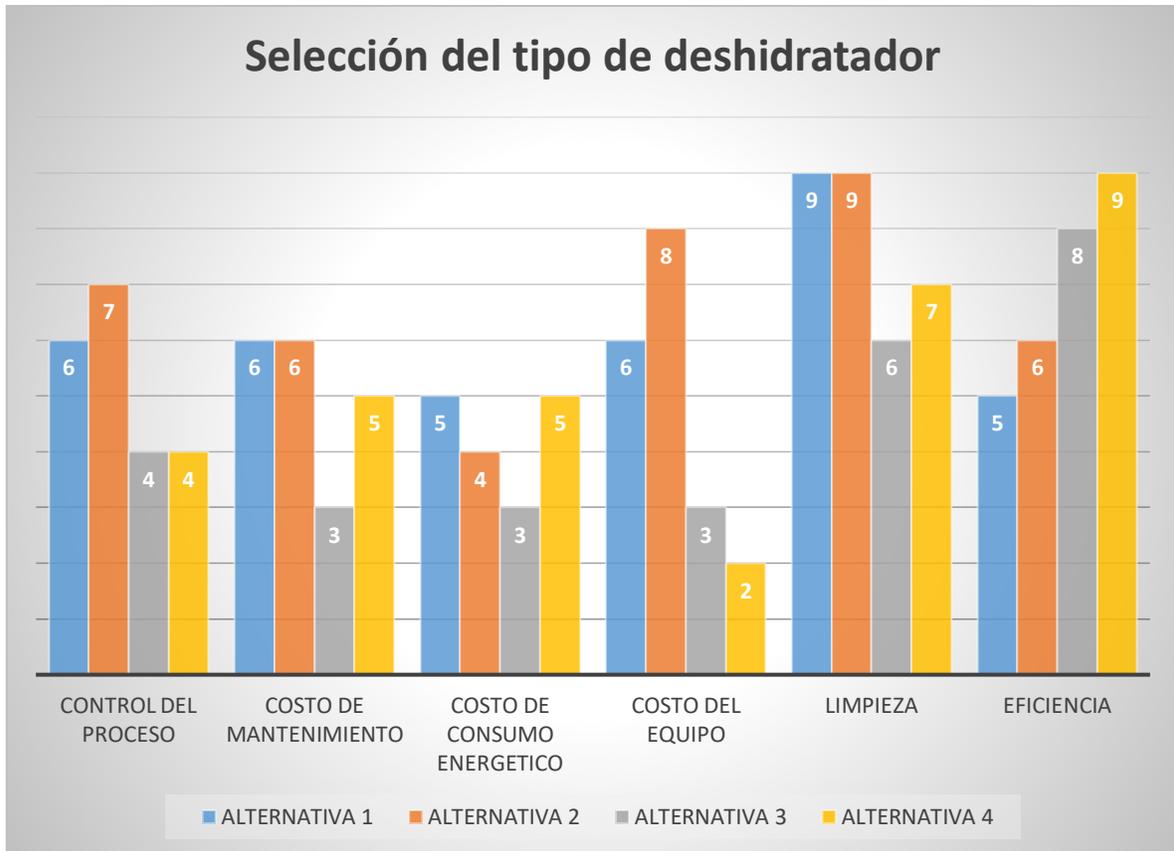


Figura 15. Diagrama de barras para la selección del tipo de deshidratador

Fuente: Autores

De acuerdo a la figura 15 y tabla 13, se encontró que la mejor alternativa para deshidratación de durazno es la número 2, ya que presenta una dominancia sobre las alternativas 1, 3 y 4 (A1, A3, A4) y no es dominada por ninguna alternativa, como se aprecia en las tablas 11 y 12, esta dominancia depende del vector peso W , el cual representa el porcentaje de importancia que tiene cada característica al momento de elegir la alternativa correcta y también depende de la calificación de las características que presenta cada alternativa (ver tabla 9).

Teniendo en cuenta los resultados entregados por el método de análisis multicriterio Electra, el orden de preferencia es $A2 > (A1, A4) > A3$.

6. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO

6.1 Diagrama de bloques del pretratamiento

El proceso de deshidratación inicia con el acondicionamiento de la fruta seleccionada para realizar las pruebas del equipo diseñado. Se seleccionó la fruta teniendo en cuenta el grado de madurez, seguidamente se realizó un proceso de lavado para eliminar impurezas, se cortó la fruta en rodajas con un espesor de 2 a 5 mm aproximadamente, para asegurar una buena transferencia de calor hacia los poros de la fruta, posteriormente se realizó la dilución de Bisulfito de sodio en agua (0,1153 M) durante un tiempo aproximado de 15 minutos antes de ser introducido en la cámara de deshidratación. El diagrama de bloques del pretratamiento se puede observar en la figura 16.

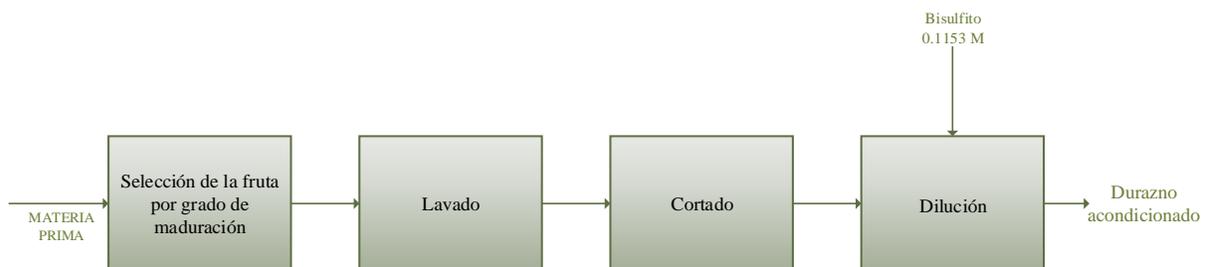


Figura 16. Diagrama de bloques del proceso de acondicionamiento de la fruta a deshidratar

Fuente: Autores

6.2 Bases de diseño

Todos los cálculos para el dimensionamiento del equipo se realizaron teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La capacidad del equipo es de 200 gramos de fruta, distribuido en tres bandejas.
- Se recomienda seleccionar previamente la materia prima a deshidratar antes de iniciar el proceso para definir las propiedades del mismo, pretratamientos y condiciones de operación.
- La presión y temperatura de diseño es de 583 mmHg y 18°C respectivamente, teniendo en cuenta las condiciones ambientales del sitio donde se encuentra localizado el equipo.
- Se establece una temperatura de operación en la cámara de deshidratación de 60°C para la fruta seleccionada.
- La humedad relativa no puede ser igual o mayor al 100%, con el fin de evitar que el aire húmedo a la salida de la cámara alcance la temperatura de rocío.
- El deshidratador contiene tres bandejas y un soporte que presenta siete divisiones cada una de 2.5 cm de distancia, lo que brinda al usuario la versatilidad de variar número de bandejas y el espaciado entre ellas.
- Se diseñó una configuración de deflectores que permiten una distribución adecuada del aire, aumentando el tiempo de residencia en la cámara de deshidratación y por ende la transferencia de masa y energía.

6.3 Diagrama de bloques del proceso de deshidratación

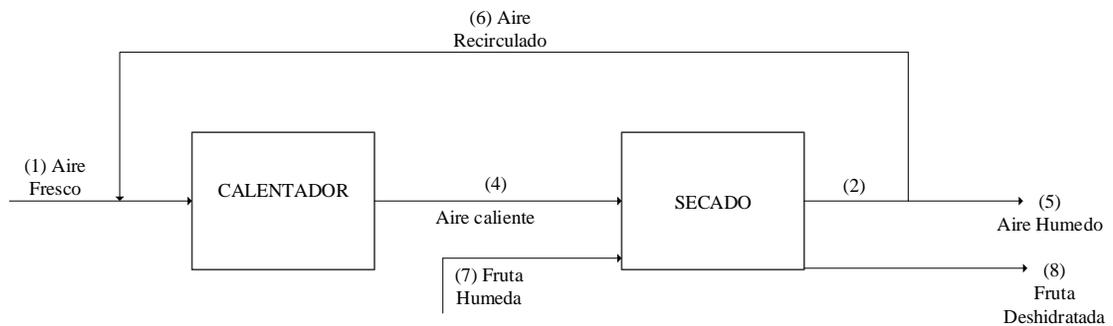


Figura 17. Diagrama de bloques del proceso de deshidratación
Fuente: Autores

6.3.1 Descripción del proceso de deshidratación

El proceso inicia con la alimentación de aire fresco a un calentador, por medio de dos ventiladores axiales conectados en serie. En el calentador se encuentran contenidas dos resistencias eléctricas de 500W cada una, ellas se encargan de aumentar la temperatura del aire hasta 60 °C, la cual es la temperatura de operación. El aire caliente es conducido hacia la cámara de deshidratación, antes de ingresar, pasa por un deflector que se encarga de distribuirlo uniformemente. El aire húmedo antes de salir de la cámara se encuentra con otro deflector, el cual permite aumentar tiempo de residencia y disminuir su velocidad de salida. Aproximadamente el 80% de la corriente de salida del proceso es recirculada teniendo en cuenta factores de diseño que aseguran un aprovechamiento energético.

6.4 Diagrama de flujo del proceso de deshidratación

El proceso inicia con la alimentación de aire fresco por medio de dos ventiladores axiales V-001A/B conectados en serie. Esta corriente es conducida a través de dos resistencias

eléctricas E-001A/B, para alcanzar la temperatura de operación de 60°C. Posteriormente el aire ingresa a la cámara de deshidratación C-001 donde se lleva a cabo la deshidratación. La fruta acondicionada se alimenta a la cámara de deshidratación y durante el proceso se miden los valores necesarios para construir la curva de secado. A la salida de la cámara de deshidratación se encuentra ubicado un damper D-001, el cual se encarga de recircular o extraer el aire húmedo. (Ver figura 17)

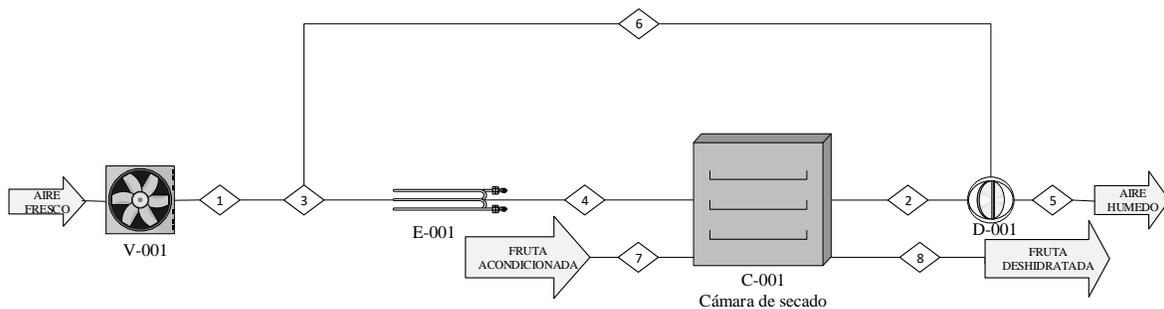


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de deshidratación (PFD)

Fuente: Autores

Los cálculos iniciales que se deben realizar para el diseño del equipo de deshidratación son el balance de masa y energía, teniendo en cuentas las propiedades psicrométricas 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.

En los procesos de deshidratación los costos energéticos son altos porque se debe calentar el aire con el que se deshidrata el producto, para disminuir dichos costos y lograr un aprovechamiento energético, se plantea recircular el aire que sale de la cámara de deshidratación. Debido a lo anterior, es importante medir la humedad y temperatura del aire en la corriente de salida de la cámara de deshidratación, para determinar la cantidad de aire

a recircular. Esta corriente al ser retornada al inicio del proceso presentará unas modificaciones al entrar en contacto con el aire fresco de la alimentación.

El aire fresco ingresa al proceso con una temperatura ambiente de 18°C y humedad relativa de 87,4%, 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 95% y una temperatura de bulbo húmedo T_{Bh} de 58,946 °C a la salida de la cámara.

Introduciendo en el software los datos mencionados anteriormente, 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 figuras 18 y 19.

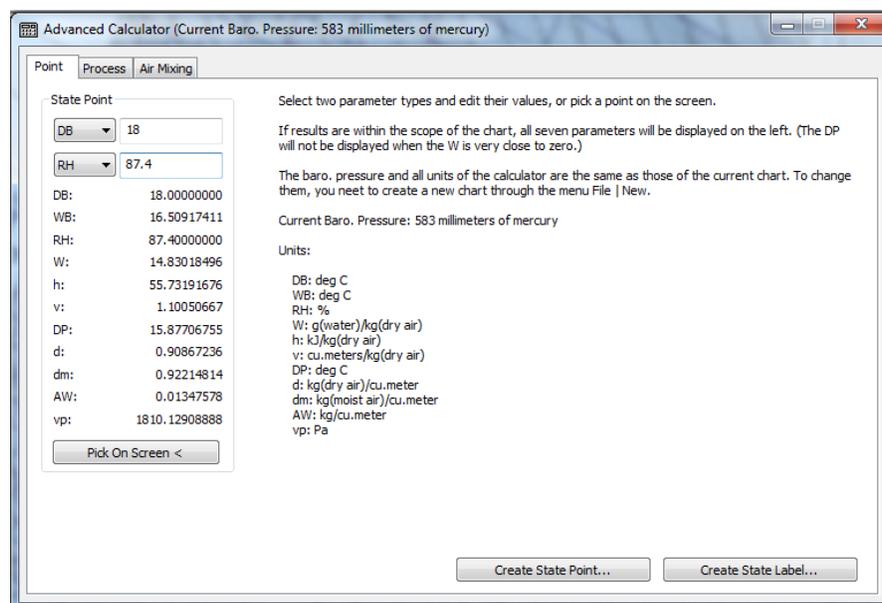


Figura 19. Propiedades del aire a la entrada, T_{BS} : 18 °C; %HR: 87,4%.

Fuente: CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo; modificado por autores

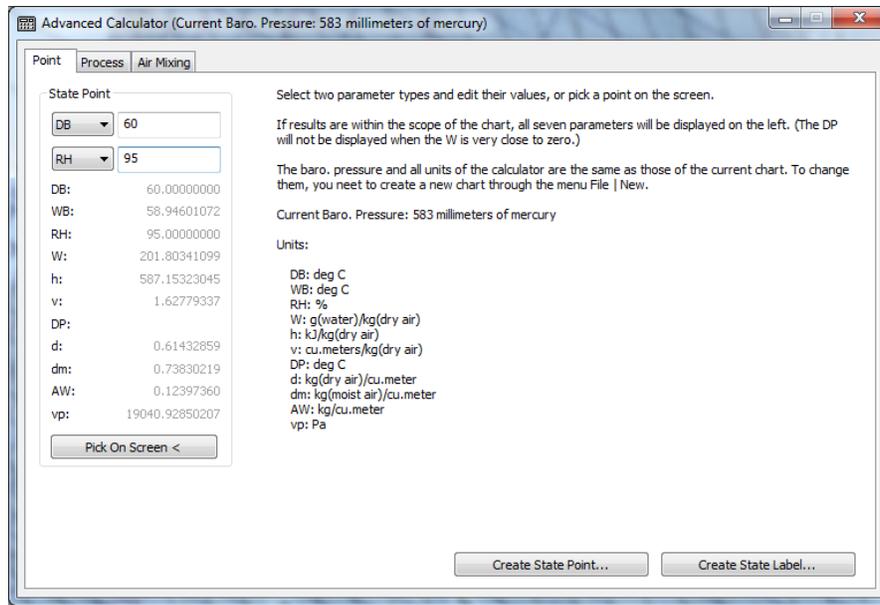


Figura 20. Propiedades del aire a la salida, T_{BS} : 60; %HR: 95%.

Fuente: CYTsoft Psychrometric Chart 2.2 Demo; modificado por autores

Especificación de las corrientes del proceso:

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

$$\%HR = 87,4\%$$

$$Ha_1 = 0,01483 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg Aire Seco}$$

Corriente 2: $T = 58,946^{\circ}\text{C}$

$$\%HR = 95\%$$

$$Ha_2 = 0,2018 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg Aire Seco}$$

Corriente 3: $T = 58,946^{\circ}\text{C}$

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

Corrientes 5 y 6: $T = 58,946^{\circ}\text{C}$

$$\%HR = 95\%$$

Corriente 7: masa = 200 g

$$T_{FRUTA} = 14^{\circ}\text{C}$$

$$X_7 = 86\%$$

Corriente 8: $T_{FRUTA} = 58,946^\circ\text{C}$

$$X_8 = 12\%$$

6.4.1 Balance de masa

Para calcular la cantidad de fruta deshidratada se desarrolla el siguiente balance:

$$m_7(1 - X_7) = m_8(1 - X_8) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

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

Se despeja m_8 y se obtiene el siguiente resultado

$$m_8 = 0,2Kg \frac{(1 - 0,86)}{(1 - 0,12)} = 0,03182 Kg$$

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

$$(m_7 * X_7) - (m_8 * X_8) = (0,2Kg * 0,86) - (0,03182Kg * 0,12) = 0,1682 Kg$$

Ecuación 15

Tabla 14. Condiciones del aire de entrada y salida

Temperatura °C	Humedad Relativa (%)	Humedad Absoluta (Kg H ₂ O/Kg Aire Seco)	Volumen específico (m ³ /Kg Aire Seco)
18	87,4	0,01483	1,1005
60	95	0,2018	1,6278

Se restan las humedades absolutas mostradas en la tabla 14 para calcular la cantidad de agua que puede absorber el aire seco.

$$0,2018 - 0,01483 = 0,18697 \text{ Kg de agua} \quad \text{Ecuación 16}$$

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

$$\dot{m}_1 = \frac{H_2O_{out} (Kg)}{\Delta H_a \left(\frac{Kg H_2O}{Kg as} \right)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

\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

Reemplazando los valores en la ecuación 17 se obtiene:

$$\dot{m}_1 = \frac{0,1682 \text{ Kg}}{0,0997 \left(\frac{Kg H_2O}{Kg as} \right)} = 0,8995 \text{ Kg de aire seco}$$

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, con base a los datos de la tabla 14 y haciendo uso de la ecuación 18:

$$V_3 = \dot{m}_1 * V \left(\frac{m_3}{Kg \text{ as}} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 18, se obtiene:

$$V_3 = 0,8995 \text{ Kg as} * 1,6278 \left(\frac{m^3}{Kg \text{ as}} \right) = 1,4642 \text{ m}^3$$

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:

$$m_1 H_{a1} + m_6 H_{a6} = m_3 H_{a3} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$m_3 = m_1 + m_6 \quad \text{Ecuación 20}$$

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. Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció una recirculación del 20%. $m_6 = 0,2m_1$. Con este dato se resolvió el balance planteado en la ecuación 18, para hallar la humedad absoluta del aire:

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

$$H_{a3} = \frac{(0,8995 \text{ Kg}) * 0,01483 \left(\frac{Kg \text{ H}_2\text{O}}{Kg \text{ as}} \right) + (0,1799 \text{ Kg}) * 0,2018 \left(\frac{Kg \text{ H}_2\text{O}}{Kg \text{ as}} \right)}{1,079 \text{ Kg}}$$

$$H_{a3} = 0,04599 \left(\frac{Kg \text{ H}_2\text{O}}{Kg \text{ as}} \right)$$

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 21:

$$m_1 C_{s1} (T_{eq} - T_0) ^\circ C = m_6 C_{s6} (T_0 - T_{eq}) ^\circ C \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

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).

$$C_s = 1.005 + 1.884 H_a \left(\frac{KJ}{Kg \text{ as} * ^\circ C} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

C_s : Calor húmedo

H_a : Humedad absoluta

Sustituyendo los valores respectivos en la ecuación 22 se obtienen los calores húmedos correspondientes:

$$C_{s1} = 1.005 + 1.884 * (0,01483) \left(\frac{KJ}{Kg \text{ as} * ^\circ C} \right) = 1,0329 \left(\frac{KJ}{Kg \text{ as} * ^\circ C} \right)$$

$$C_{s6} = 1.005 + 1.884 * (0,2018) \left(\frac{KJ}{Kg \text{ as} * ^\circ C} \right) = 1,3852 \left(\frac{KJ}{Kg \text{ as} * ^\circ C} \right)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 21 es posible calcular el valor de la temperatura de equilibrio:

$$\begin{aligned}0,8995Kg\ as * 1,0329\left(\frac{KJ}{Kg\ as * ^\circ C}\right)(T_{eq} - 18^\circ C) \\ = 0,1799Kg\ as * 1,3852\left(\frac{KJ}{Kg\ as * ^\circ C}\right) * (58,946^\circ C - T_{eq}) \\ T_{eq} = 26,659\ ^\circ C\end{aligned}$$

6.4.2 Balance de energía

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

$$Q = m_{H_2O} * C_{pH_2O} * \Delta T + m_{H_2O} * \Delta H_{vapH_2O} + m_{fruta} * C_{pfruta} * \Delta T \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

Q : Energía total que le entrega al aire en KJ

m_{H_2O} : Masa de agua a evaporar

C_{pH_2O} : Capacidad calórica del agua

ΔT : Diferencial de temperaturas de entrada y salida del equipo

ΔH_{vapH_2O} : Entalpia de vaporización del agua

m_{fruta} : Masa de durazno

C_{pfruta} : 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):

$$C_{pfruta} = 1,424X_C + 1,549X_P + 1,675X_F + 0,837X_A + 4,187X_W \left(\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right)$$

Ecuación 24

Donde:

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.

Los valores de la composición del durazno son dados en fracciones másicas y se tomaron de la información proporcionada por la hoja de balance de alimentos colombiana del año 2010 (ICBF & FAO, 2014). En la tabla 15, se observa el valor de cada uno de ellos.

Tabla 15. Principales compuestos presentes en el Durazno

Proporción a 100g	Durazno(% másico)
Carbohidratos	12,5
Proteínas	1
Grasa	0,1
Cenizas	0,43
Agua	86

$$C_{pfruta} = 1,424(0,125) + 1,549(0,01) + 1,675(0,001) + 0,837(0,0043) \\ + 4,187(0,86)$$

$$C_{pfruta} = 3,7996 \left(\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right)$$

Reemplazando la ecuación 23 se obtiene:

$$Q = (0,1681) \left(4,18435 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right) (60 - 18)^{\circ}C + (0,1681) \left(2383,33 \frac{KJ}{Kg} \right) \\ + (0,0318) \left(3,7996 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right) (60 - 18)^{\circ}C$$

$$Q = 435,255 KJ$$

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

$$P = 435,255KJ \frac{1KW_h}{3600000KJ} = 0,000121 KW_h \quad \text{Ecuación 25}$$

Cálculos hidráulicos en el proceso de deshidratación

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 siguiente ecuación para una tubería circular:

$$N_u = \frac{h * D}{K} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

N_u : Número de Nusselt

h : Coeficiente de convección

D : Diámetro interno de la tubería

Con el fin de resolver la ecuación 26 se debe hallar el número de Nusselt con el fin de despejar e 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 27 y 28.

$$R_e = \frac{D * \vartheta * \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

R_e : Número de Reynolds

D : Diámetro interno de la tubería

ϑ : Velocidad del flujo de aire

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica

Reemplazando los valores en la ecuación 27 se obtiene el siguiente valor

$$R_e = \frac{(0,078m) * \left(\frac{4m}{s}\right) * \left(1,2124 \frac{Kg}{m^3}\right)}{1,8158 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m * s}} = 20832,074$$

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

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{K} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

Pr : Número de Prandtl

C_p : Capacidad calorífica

K : Velocidad de difusión de calor

$$Pr = \frac{\left(1007 \frac{J}{Kg * K}\right) * \left(1,8158 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m * s}\right)}{0,024988 \frac{J}{s * m * K}} = 0,7317$$

Con estos resultados se toma la decisión de la ecuación de Nusselt a utilizar con ayuda de la tabla 6-6 del handbook of processing equipment (G. D. Saravacos & Kostaropoulos, 2002).

$$Nu = 0,026 * Re^{0,8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Reemplazando se obtiene:

$$Nu = 0,026 * (20832,074)^{0,8} * (0,7317)^{\frac{1}{3}} = 18,066$$

Despejando el coeficiente de convección de la ecuación 26 y sustituyendo los valores se obtiene:

$$h = \frac{18,066 * 0,024988}{0,077} = 5,7932$$

Teniendo en cuenta la ecuación 27 y que la cámara de secado es rectangular se halla un número de Reynolds con el fin de conocer el comportamiento de fluido dentro de la misma, como la geometría es diferente a una circular se halla un diámetro hidráulico.

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

$$D_H = \frac{4(0,12m^2)}{(1,4m)} = 0,3428m$$

Reemplazando en la ecuación 27 se obtiene:

$$R_e = \frac{(0,3428m) * \left(\frac{4m}{s}\right) * \left(1,2124 \frac{Kg}{m^3}\right)}{1,8158 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m * s}} = 91600$$

El Reynolds dentro de la cámara de secado es turbulento y se observa un aumento con respecto al de la tubería de entrada, esto se debe a que es mayor el área transversal.

6.5 Simulación del proceso de deshidratación

La simulación del proceso de deshidratación se realizó haciendo uso del software Hysys V8.8. La figura 21 es una representación de la hidráulica que compone el equipo diseñado y el paquete termodinámico usado fue Peng-Robinson.

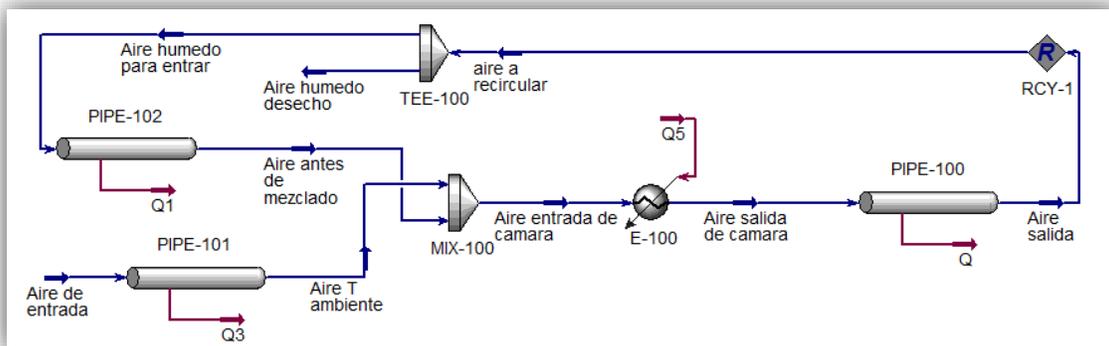


Figura 21. Simulación del proceso de deshidratación

Fuente: Autores

Al realizar el análisis de la hidráulica obtenida en la simulación, se tomó la decisión de construir el equipo con una tubería de tres pulgadas y realizar una recirculación del 80%, para el proceso de deshidratación del durazno, estos valores pueden ser modificados dependiendo a las condiciones del producto a deshidratar en el simulador y así obtener una predicción de los resultados del proceso.

Los datos obtenidos de las corrientes de entrada y salida del proceso en la simulación son los que se observan en la tabla 16. Se puede observar que flujo del aire es turbulento lo cual comprueba el valor calculado anteriormente.

Tabla 16. Parámetros de las corrientes de entrada y salida del proceso.

Parámetro/ Corriente	Aire de entrada	Aire salida	Aire húmedo deseco	Aire entrada de cámara
Temperatura (°C)	18	58,8	58,8	47,4
Presión (psia)	11,27	10,10	10,11	10,10
Velocidad de aire (m/s)	5,64	10,78	2,153	10,40
Número de Reynolds	21850	29690	5939	30470
Flujo del aire (m ³ /h)	0,1	0,15	0,03	0,15

*Tomados de simulador Hysys

Los datos de cada una de las corrientes del proceso de deshidratación en la simulación se pueden observar en el anexo 9.

6.6 Diagrama P&ID del proceso

El diagrama de tubería e instrumentación se encuentra en el anexo 3 con su respectivo sistema de control. Se realizó teniendo en cuenta las normas ISA (Instrument Society of America).

El proceso inicia con la alimentación de aire fresco a temperatura ambiente, por medio de dos ventiladores axiales V-001A/B conectados en serie, el flujo de aire de los ventiladores se mide con ayuda de un anemómetro y se puede modificar por medio de un damper hasta llegar al flujo deseado.

Este aire pasa por una tubería de 3 pulgadas en acero inoxidable, en donde se encuentran contenidas las resistencias eléctricas de 1000W E-001A/B, las cuales se encargan de calentar el aire hasta una temperatura de 60°C, dicha temperatura se mantiene dentro de la cámara de deshidratación C-001 por medio de un control on/off enlazado con las resistencias. En la entrada y salida de la cámara se cuenta con un sensor de temperatura y humedad

El aire caliente pasa por un deflector a la entrada de la cámara de deshidratación, diseñado en forma de circunferencia con orificios en el centro encarga de distribuir el aire uniformemente en toda la cámara y que las tres bandejas del equipo tengan mayor contacto con el flujo de aire. La alimentación de las bandejas es de durazno en rodajas de aproximadamente 5mm de espesor con previo pretratamiento, esta fruta se encuentra separada una rodaja de la otra sobre cada bandeja, iniciando así el proceso de deshidratación, el aire antes de salir choca con otro deflector similar al de la entrada pero sin orificios, el cual se encarga de mantener un tiempo más prolongado el flujo de aire en la cámara y que la salida de este sea lenta, la tubería de salida posee una bifurcación para la recirculación del aire y en ella misma se encuentra un dämpen D-001 que regula la cantidad de aire a recircular en el proceso desde 0 a un 100%, por factores de diseño se recircula un 80% del aire húmedo que

- TI-002: Indicador de temperatura, este se encuentra dentro de la cámara de deshidratación.
- TIC-001: Controlador indicador de temperatura, es el encargado de recibir la información del indicador de temperatura que se encuentra dentro de la cámara de deshidratación (TI-002), en el momento que este indicador mida una temperatura de 60°C, el controlador enviara una señal de apagado a las resistencias y cuando esta temperatura inicie a disminuir se enciendan de nuevo, siendo este un sistema de control ON-OFF

Por lo tanto, las estrategias de los lazos de control, funciones lógicas, funciones secuenciales y otros algoritmos de control podrán ser ejecutados

El proceso de control consiste en censar la temperatura del aire en la cámara de deshidratación, esta información es enviada al controlador de temperatura TIC-001, el cual se encarga de mantener la temperatura en 60 °C, mediante la manipulación de la resistencia E-001 si las condiciones de proceso cambian. El sistema de deshidratación cuenta con sensores de temperatura y humedad a la entrada y salida de la cámara de deshidratación. La entrada de aire es monitoreada mediante un anemómetro SI-001 y ajustada mediante el dimmer conectado al ventilador V-001.

Para mejorar la seguridad del proceso se instala sistema de shutdown, el cual debe ser activado en caso de presentarse un sobrecalentamiento en el ventilador o las resistencias que puedan provocar incendio.

6.7 Condiciones normales de operación

A continuación, se presenta en las tablas 16 y 17, las condiciones de diseño y de operación del deshidratador de frutas.

Tabla 17. Variables en condiciones de diseño.

Especificación	Valor
Temperatura de entrada del aire	18°C
Temperatura de deshidratación (°C) (Pelentir, Block, Monteiro Fritz, Reginatto, & Amante, 2011)	45-65 °C
Presión (mmHg)	583 mmHg
Velocidad del aire (m/s)	1-10 m/s
Calor suministrado (KJ)	435,255 KJ
Recirculación de aire húmedo (%) (Perry et al., 2001)	80-95%
Peso de la fruta (g)	200g

Estas condiciones son el resumen de una serie de artículos y manuales, en donde se realizan dichas estimaciones que se deben tener en cuenta en el momento de diseñar un equipo para la deshidratación de alimentos.

Tabla 18. Variables en condiciones normales de operación

Especificación	Valor
Temperatura de entrada del aire	18°C
Temperatura de deshidratación (°C)	60°C
Presión (mmHg)	583 mmHg
Velocidad del aire (m/s)	4 m/s
Calor suministrado (KJ)	435,255 KJ
Recirculación de aire húmedo (%)	80%
Peso de la fruta (g)	200g

6.8 Data Sheet de servicios industriales requeridos

Tabla 19. Data Sheet de servicios industriales requeridos.

Equipo/ sistema	TAG	Aire		Energía			Descripción
		Instrumento (NCMH)	Industrial (m ² /h)	Potencia Eléctrica (KWh)	Gas combustible (NCMH)	Combustible Diésel (lph)	
Ventilador	V-01	-	-	0,019KWh	-	-	Equipo usado para alimentar aire fresco al deshidrador
Resistencia	E-001	-	-	1KWh	-	-	
Sistema de control	CT-001	-	-	0,0125KWh	-	-	Instrumentación requerida para operar incluye controlador, relés, arduino, LCD, diodo, luces led, dimmer.
Total Consumo	0	0	0	1,0285KWh	0	0	

6.9 Data sheet de equipos principales del equipo de deshidratación

Tabla 20. Data Sheet de equipos principales del equipo de deshidratación.

TAG	Equipo	Fluido	Tipo	Dimensiones			Condiciones de operación		Material
				Alto (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	Temperatura (°C)	Presión (mmHg)	
V-001	Ventilador axial	Aire	Horizontal	12	3,8	12	18	583	Aluminio fundido
E-001	resistencias	Aire fresco	Horizontal	4,5	4,3	27	60	583	Ferroníque 1
C-001	Almacenar la fruta en bandejas	Aire caliente /fruta a deshidratar	Horizontal	43	35	61	60	583	Acero inoxidable 304

6.9.1 Especificaciones de los equipos principales en el proceso de deshidratación.

- **Cámara de deshidratación**

Para el dimensionamiento de la cámara de deshidratación, se tuvieron en cuenta los factores de diseño del espaciado entre bandejas y el área que ellas poseen tomados de (Perry et al., 2001) , estas dimensiones se pueden observar en el anexo 2. Debido al anterior planteamiento se consideró una distancia entre el soporte de las bandejas y las paredes de la cámara, esto con el fin de permitir una distribución del flujo de aire y conservar la temperatura. Las especificaciones de la cámara de deshidratación se encuentran en el anexo 1.



Figura 23. Cámara de deshidratación.

Fuente: Autores

- **Ventilador**

Para la selección del ventilador, se consideró el caudal y la presión de trabajo. En este caso, se preselecciono un ventilador tomando una velocidad del aire de 4 m/s y una sección transversal libre A_l que resulta de la diferencia del área del ducto y el área ocupada por la sección transversal de cada una de las bandejas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_l = A_d - 3 * A_{ld} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$A_l = 43\text{cm} - 3 * 2,23\text{cm}^2 = 36,31\text{cm}^2 = 0,003631\text{m}^2$$

El caudal de aire se determina con la siguiente ecuación:

$$Q = v * A_l \quad \text{Ecuación 31}$$

$$Q = \frac{4\text{m}}{\text{s}} * 0,003631\text{m}^2 = 0,0145 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cong 30,2587 \text{CFM}$$

Por consiguiente, las especificaciones de ventilador seleccionado son:

Ventilador axial de 110/120V, con una potencia de 19/15W y un volumen de aire de 83/87 CFM. Se sobredimensionó con el fin de prevenir fallos en el momento del funcionamiento del equipo y para futuras investigaciones en donde se necesite un flujo de aire mayor al definido en este caso. En la figura 24 se ilustra la imagen del ventilador axial utilizado en el proceso.



Figura 24. Ventilador axial de 110/120V

Fuente: Autores

- Resistencias eléctricas

Se calcula los requerimientos de energía calorífica en kWh, por medio de la siguiente ecuación:

$$P = Q * \rho_a * C_p * (T_{op} - T_a) * F.S \quad \text{Ecuación 32}$$

Con las temperaturas de entrada y salida, $T_a = 18^\circ C$ y $T_{op} = 60^\circ C$ respectivamente, un factor de seguridad de 1,05 para tolerar pérdidas de calor en el sistema, y las variaciones de flujo y voltaje, fue usada la ecuación 28 para conocer el valor de la potencia requerida obteniendo así:

$$P = 0,0145 \frac{m^3}{s} * 1,1449 \frac{Kg}{m^3} * 1,006 \frac{J}{K} * (60 - 18)^\circ C * 1,05 = 0,7365 \text{ kW}$$

Teniendo en cuenta que las pérdidas de calor son casi nulas, el valor de potencia requerido por las resistencias para aumentar la temperatura del aire es de 736,5W. Con este cálculo se sobredimensionó la potencia, por ello se decidió hacer uso de dos resistencias de 500W cada una pensando en futuras investigaciones con otros productos a deshidratar. En la figura 25, se puede observar la configuración de estas dos resistencias, las cuales están compuestas de ferroníquel en el interior del material, polvo conductor y cobre en su capa exterior.



Figura 25. Resistencias eléctricas
Fuente: Autores

6.9.2 Componentes auxiliares que influyen en el proceso de deshidratación.

- **Aislante**

En la construcción del deshidratador se tomó la decisión de realizar el aislamiento con fibra de vidrio ya que posee una buena relación entre resistencia térmica y precio. Se utilizó lana de vidrio hidrorrepelente marca Isover como la que se observa en la figura 26, la cual está revestida en una de sus caras con un complejo de foil de aluminio que actúa como una barrera de vapor.

El aislamiento del equipo se realizó para la cámara de deshidratación debido a que la pérdida de calor en la tubería es despreciable. En cada una de las caras de la cámara se recubrió con este aislante excepto en la frontal, esto permite que se conserve una temperatura estable en el interior de la misma brindando protección a los operarios.



Figura 26. Aislante de fibra de vidrio.

- **Soporte y bandejas**

El equipo cuenta con tres bandejas construidas en acero inoxidable 304 perforado de 35x22 cm, estas se encuentran sostenidas dentro de la cámara de deshidratación por un soporte, el cual cuenta con 6 divisiones de 2,5cm de distancia entre ellas, esto con el fin de tener la facilidad de variar la distancia entre las tres bandejas, como se observa en la figura 27.



Figura 27. Soporte con bandejas

Fuente: Autores

- **Deflectores**

Es un componente que permite distribuir el flujo de aire en toda la cámara de deshidratación y al mismo tiempo logra mantenerlo por un tiempo más prolongado. El equipo cuenta con dos deflectores de un diámetro de 10cm cada uno y están fabricados en acero inoxidable 304, el primero está localizado a la entrada de la cámara y posee una configuración de orificios, el segundo se encuentra ubicado a la salida de la cámara y su superficie es lisa, como se observa en la figura 27.

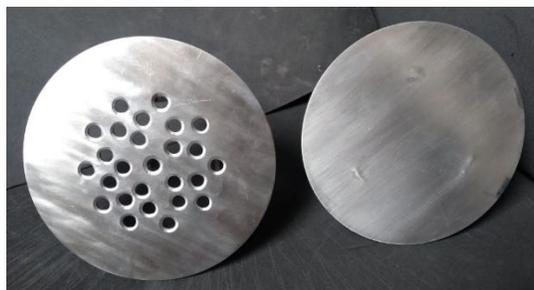


Figura 28. Deflectores del equipo de deshidratación

Fuente: Autores

- **Tubería**

La tubería es de 3 pulgadas de diámetro de acero inoxidable 304 quirúrgico, la cual cuenta con bridas en cada uno de sus extremos para facilitar la unión y desarme de las mismas, entre la unión de cada una de las bridas se sujeta un corcho para evitar fugas de flujo de aire. Esta tubería es la encargada de permitir el paso de las corrientes de entrada, salida y recirculación al proceso.



Figura 29. Tubería del equipo de deshidratación.

Todo el equipo se construyó en acero inoxidable 304 quirúrgico según la norma ASTM A-36 (ASTM, 2014), la cual enuncia que los equipo construidos para alimentos se debe construir en este material ya que no es corrosivo y es higiénico para cualquier operación.

- **Damper**

Es un equipo auxiliar que tiene la función de controlar el aire a recircular en el proceso, se opera manualmente y cuenta con una perilla la cual le permite al usuario graduar un reciclo de aire desde un 80 a un 95% , se encuentra construida en acero inoxidable 304 y está ubicado sobre el final de la tubería por donde fluye la corriente de salida (Mujumdar, 2014).



Figura 30. Damper del equipo de deshidratación

Fuente: Autores

- **Anemómetro**

Es un instrumento que se utilizó para medir la velocidad del aire antes de entrar a la cámara de deshidratación, con el fin de conocerla y regularla hasta la adecuada para el proceso. El anemómetro se observa en la figura 31 y cuenta con las siguientes características, temperatura de funcionamiento $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, Humedad relativa de funcionamiento menor o igual al 90% y mide una velocidad de aire de 0 a 30 m/s.



Figura 31. Anemómetro

Fuente: Vendedor

6.10 Diagrama isométrico del equipo de deshidratación

Los planos isométricos con las medidas detalladas del diseño y la construcción, para el equipo de deshidratación con sus respectivas bandejas, soporte y accesorios del equipo, se encuentran en los anexos 4, 5 y 6.

6.11 Plot plant

El plot plant del laboratorio de ingeniería química se encuentra en el anexo 10, en el cual se señala la ubicación del equipo de deshidratación.

7. CONTROL DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN

Para llevar a cabo el proceso de deshidratación fue necesario utilizar una serie de componentes electrónicos los cuales nos ayudaron a medir, visualizar y a mantener las diferentes variables de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en valores deseados para hacer lo más óptimo posible el proceso, a continuación, definiremos detalladamente cada componente utilizado en el equipo.

7.1 Componentes utilizados en el equipo

- **Arduino Atmega 2560**



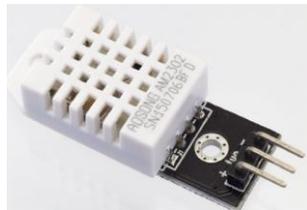
Es una board electrónica basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida digitales (15 pines pueden ser usados para señales de salida PWM). Tiene 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware para puertos seriales), maneja una frecuencia de reloj de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP y un botón de reset, contiene todo lo que el microcontrolador necesita para funcionar en óptimas condiciones. Este equipo se utilizó para programar un control ON/OFF el cual nos permitió mantener la temperatura de la cámara deseada controlada.

- **Dimmer regulador de voltaje por scr 2000W**



Este módulo regulador de voltaje de alta potencia bidireccional se usó para variar el voltaje de alimentación del ventilador y así poder configurar el flujo de aire requerido para dicho proceso, posee cuatro borneras las dos primeras se conectan a 120 voltios y las dos restantes se conectan al ventilador respectivamente.

- **Dth 22**



Es un sensor básico digital de medición de temperatura y humedad. Este sensor está basado en un termistor que sirve para medir el aire circundante (temperatura) e implementa un sensor interno capacitivo para la medición de humedad. Posee tres pines el primero se conecta a tierra, A través del pin dos (DATA) se obtiene una señal digital que es tratada a través de la board arduino, y a través del pin tres se conecta a 5voltios. Se ubicaron dos dispositivos de este tipo repartidos en la entrada y salida de la cámara de deshidratación y fueron utilizados para medir específicamente la humedad en estos respectivos lugares que se visualizaron por medio de una lcd. La temperatura arrojada por estos sensores no se tomó en cuenta debido a

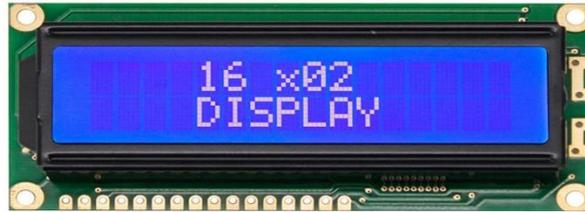
su amplio margen de error a la hora de marcar los valores, y para ello se utilizaron otros dispositivos.

- **NTC 10kohm**



Este es un sensor de temperatura NTC de un valor de resistencia de $10\text{K}\Omega \pm 1\%$, posee un cable de conexión de 1 metro de longitud, proporcionando un excelente rendimiento y estabilidad. Este sensor está hecho de cobre niquelado en forma cilíndrica con un diámetro de 4mm y un largo de 25mm; puede medir temperaturas en un rango de -40°C a 120°C . Posee dos pines de conexión; uno va a una resistencia de 10kohm y a tierra, el otro es alimentación de 5 voltios. En medio del sensor y la resistencia es donde se toma la señal analógica. Fueron utilizados tres instrumentos de este tipo debido a su mayor exactitud y precisión, uno fue ubicado en la parte media de la cámara de deshidratación para medir la temperatura y llevar a cabo el control ON/OFF con él, y dos fueron distribuidos a la entrada y salida de la cámara reemplazando las medidas de temperatura marcadas por los sensores dth22. Todos estos valores de igual forma se ajustaron para ser visualizados en una lcd.

- **LCD 16x2**



La LCD 16x2 de fondo azul es una pantalla que permite visualizar todo tipo de caracteres en dos líneas. Dichos caracteres vienen por defecto según los códigos de programación, o también pueden ser creados y/o diseñados por el usuario. Dos lcds de este tipo nos permitieron visualizar las diferentes temperaturas y humedades utilizadas en el proceso para la toma de datos y análisis de los resultados.

- **Potenciómetro 10k**



Esta resistencia variable se utilizó para acomodar el contraste de nuestra lcd y poder visualizar mejor nuestras variables.

- **Relé 12v**



Permite controlar el encendido y apagado de cualquier aparato que se conecte a una fuente de alimentación eléctrica externa. El relé hace de interruptor y se activa y desactiva mediante una entrada de datos. Gracias a esto se puede controlar el encendido de cualquier aparato. A parte del pin que controla al relé. Hay varios modelos con distintos voltajes de entrada. Si queremos utilizarlo desde la board Arduino sin necesidad de otra fuente de alimentación, la alternativa debería de ser de 5V, pero podría ser de 12V (que son los más comunes).

Fue usado para controlar por medio del encendido y apagado de nuestra resistencia calefactora la temperatura optima del aire en la cámara de deshidratación.

- **Diodo 4004**



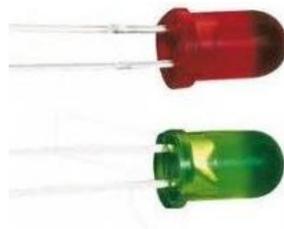
Nos brindó seguridad a nuestra placa de arduino, al colocarlo en paralelo con el relé permite el flujo de corriente en una sola dirección y evita corrientes inversas, lo cual podría quemar nuestra placa.

- **Regulador 7812, 7805**



El regulador puede proporcionar una regulación en tarjeta local, lo que elimina los problemas de distribución asociados con la regulación de un único punto. Emplea una limitación de corriente interna, desconexión térmica y protección de área de operación segura. Al instalar una disipación de calor adecuada, el dispositivo puede proporcionar una corriente de salida superior a 1A. Aunque se ha diseñado principalmente para funcionar como regulador de tensión lineal, este dispositivo se puede utilizar con componentes externos para obtener tensiones y corrientes ajustables, en nuestro caso se utilizó para la alimentación del relé un 7812 y para la alimentación de la lcd un 7805.

- **Luces led**



Estas luces nos indican el estado de las resistencias, es decir; si el led verde está encendido significa que la resistencia está en funcionamiento aportando calor al aire y que la temperatura debe subir hasta llegar a la temperatura optima de operación en la cámara, pero si el led rojo está alumbrando, quiere decir que la temperatura es muy alta y por ende se apaga

automáticamente la resistencia para disminuir el aporte de calor para el aire y equilibrar la temperatura en la cámara.

- **Botón de paro**



Este botón nos permite parar el proceso de forma inmediata en caso de que algo este mal, se utiliza como sistema de seguridad para evitar cualquier tipo de inconvenientes.

7.1.1 Circuito impreso

- **Esquemático**

Este es el diagrama de conexiones el cual se creó en el programa proteus, es el que nos permite conectar todos los componentes utilizados en el equipo y poder hacer un mejor manejo y distribución de los mismos. La imagen de este circuito se puede observar en el anexo 5.

- **Pcb**

Es en el cual realizamos el diseño de las pistas y conectores. Se exportó en formato para después poder imprimirlo y ponerlo sobre la baquela que compone nuestro circuito. En el anexo 6 se puede detallar el circuito Pcb.

8. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE DESHIDRATACIÓN.

A continuación, se dará un detallado del costo del equipo en las tablas 21 y 22, de los materiales y el control respectivamente.

Tabla 21. Costos de los materiales y servicios requeridos para la fabricación del equipo de deshidratación.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
lamina inox cal 18	1	\$ 480.000,00	\$ 480.000,00
tubo inox cal 16	4	\$ 40.000,00	\$ 160.000,00
codo de 3 pulgadas inox cal 16	4	\$ 15.000,00	\$ 60.000,00
aporte inox de 1/16 308L	25	\$ 1.000,00	\$ 25.000,00
moneda inox de 5 pulg por 1/8 de espesor	10	\$ 6.000,00	\$ 60.000,00
Servicio de taladro de árbol	3	\$ 30.000,00	\$ 90.000,00
Servicio de Equipo de soldadura por arco eléctrico	4	\$ 20.000,00	\$ 80.000,00
servicio de dobladora y cortadora de láminas manual	3	\$ 10.000,00	\$ 30.000,00
Servicio de equipo de soldadura TIG	16	\$ 30.000,00	\$ 480.000,00
servicio de pulidora	5	\$ 10.000,00	\$ 50.000,00
servicio de satinadora	48	\$ 10.000,00	\$ 480.000,00
servicio de fabricación y pegada de puerta en vidrio	1	\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
servicio de taladro y motortool manual	2	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
		SUBTOTAL	\$ 2.065.000,00
		TOTAL	\$ 2.260.000,00

Tabla 22. Costo de los equipos de deshidratación

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Diodo	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Led verde y roja	2	\$ 200,00	\$ 400,00
Bornera 2 pines azul	7	\$ 1.000,00	\$ 7.000,00
Arduino mega	1	\$ 60.000,00	\$ 60.000,00
Arduino nano	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
LCD 16X2	2	\$ 14.000,00	\$ 28.000,00
Ventilador axial	2	\$ 25.000,00	\$ 50.000,00
Anemómetro	1	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00
Resistencias	2	\$ 20.000,00	\$ 40.000,00
Cable siliconado	4	\$ 3.500,00	\$ 14.000,00
Dimmer	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
Cable encauchado	4	\$ 2.000,00	\$ 8.000,00
Termómetro	1	\$ 14.000,00	\$ 14.000,00
cable dúplex	4	\$ 1.900,00	\$ 7.600,00
resistencias c-4 220 ohm	5	\$ 20,00	\$ 100,00
resistencia c-9 10K	5	\$ 20,00	\$ 100,00
botón de paro	1	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
Regulador 7812, 7805	2	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00
Relé 12 V	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Potenciómetro 10K	2	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
NTC 10K	3	\$ 4.500,00	\$ 13.500,00
DTH 22	2	\$ 23.000,00	\$ 46.000,00
cable eléctrico	3	\$ 2.000,00	\$ 6.000,00
baquela	2	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00
circuito impreso	2	\$ 15.000,00	\$ 30.000,00
mano de obra	1	\$ 200.000,00	\$ 200.000,00
		Total	\$ 647.800,00

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se realizó la determinación del contenido de humedad del durazno, por medio de una balanza de humedad y con los valores obtenidos se graficó la curva presentado en la figura 32.

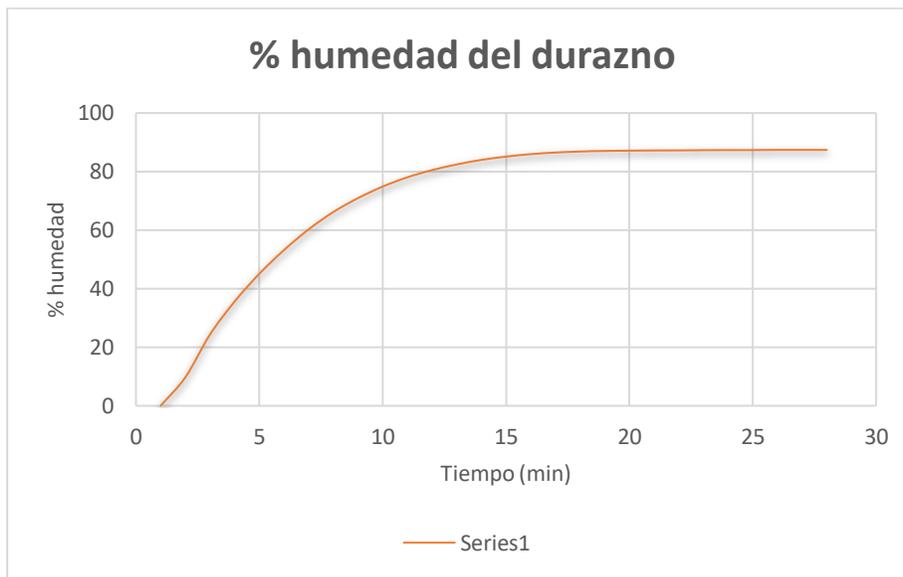


Figura 32. Curva para la determinación de la humedad del durazno

Fuente: Autores

De la gráfica se puede concluir que la humedad del durazno es de 87,4%, en la literatura el valor encontrado fue de 85%, comparando estos dos valores se observa una diferencia que se debe a las condiciones climáticas ya que en la literatura se encuentra un valor standard, por ello se decidió realizar los cálculos en base a la humedad obtenida con la balanza.

Con el fin de observar el desempeño y operatividad del deshidratador se efectuaron pruebas para recolectar información acerca de él.

La primera prueba del equipo de deshidratación se realizó teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Temperatura constante en la cámara de deshidratación de 60°C.
- Velocidad de aire de 5,7 m/s.
- Humedad relativa del ambiente del 57%.
- Recirculación del 80%.
- Espaciado de 5cm entre bandejas.
- Espesor del durazno a deshidratar de 3mm aproximadamente sin ningún tipo de pretratamiento.

Teniendo en cuenta la definición de humedad en base húmeda y base seca, se utilizaron los datos arrojados por el equipo de deshidratación para observar el comportamiento de estas variables con respecto al tiempo de deshidratación, como se observa en las figuras 33 y 34.

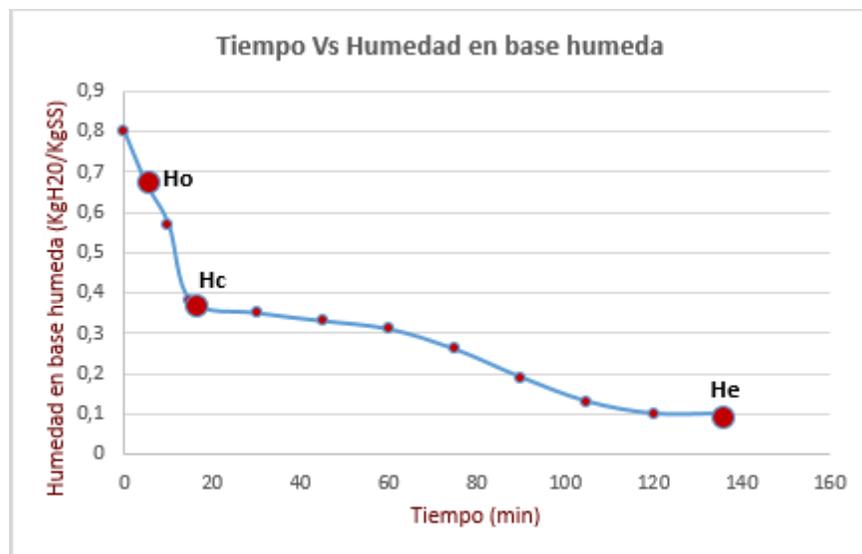


Figura 33. Humedad en base húmeda Vs Tiempo

Fuente: Autores

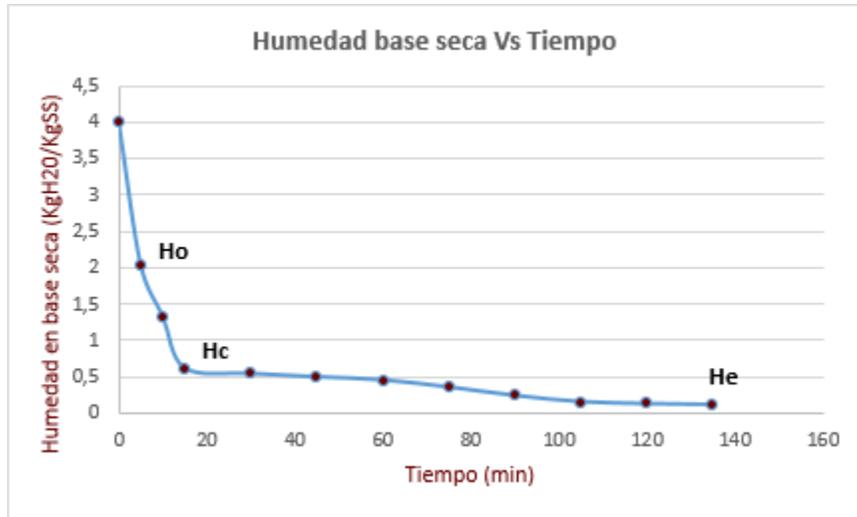


Figura 34. Humedad en base seca Vs Tiempo

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 analizó que en esta etapa la temperatura de bulbo húmedo es similar a la temperatura de operación con un valor de 59,2°C dado que las condiciones de la superficie del producto permiten evaporar agua al mismo tiempo que puede absorber calor de los alrededores.



Figura 35. Fruta deshidratada

En la figura 35, se observa las condiciones físicas del durazno al terminar el proceso de deshidratación con un porcentaje de humedad del 11%. Una parte del producto se encontró adherido a la superficie de las bandejas ya que el corte de la fruta era de aproximadamente 3 mm, con lo cual se recomienda mantener un grosor de aproximadamente 5mm.

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.

En la segunda prueba realizada las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Temperatura constante en la cámara de deshidratación de 55°C.
- Velocidad de aire de 4,5 m/s.
- Humedad relativa del ambiente del 57%.
- Recirculación del 95%.
- Espaciado de 5cm entre bandejas.
- Espesor del durazno a deshidratar de 5mm aproximadamente con previo pretratamiento.

Se hizo un ajuste en las variables mencionadas anteriormente en comparación con la prueba número uno, obteniendo los resultados mostrados en la figura 36 y 37 respectivamente.

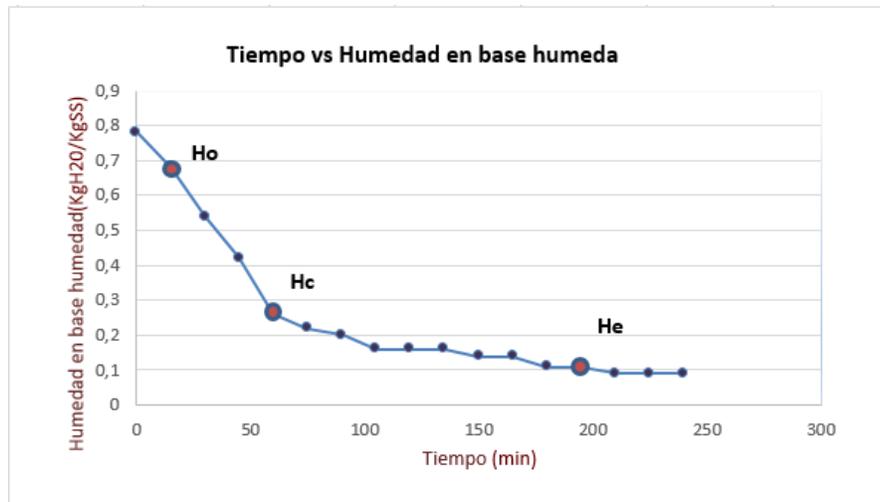


Figura 36. Humedad en base húmeda Vs Tiempo

Fuente: Autores

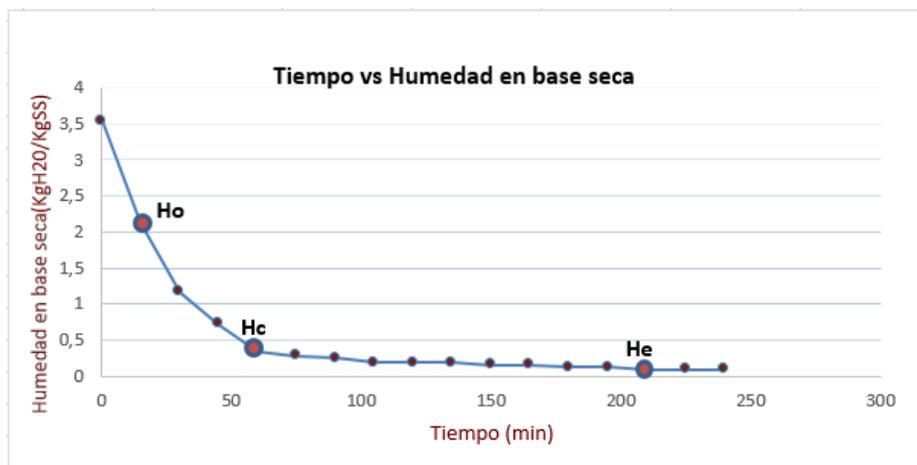


Figura 37. Humedad en base seca Vs Tiempo

Fuente: Autores

Para la segunda prueba se obtuvieron resultados que permitieron evidenciar un comportamiento similar en la curva de secado a la hora de la deshidratación. Aun así, dadas las condiciones operacionales para este segundo caso, con un tiempo de deshidratación de 3 horas y media el cual fue mayor al de la primera prueba, 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 95% en comparación con el 80% 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 38. Durazno en pretratamiento con bisulfito de sodio



Figura 39. Durazno deshidratado

Se realizó el pretratamiento de las rodajas de durazno con bisulfito de sodio, como se observa en la figura 38, seguidamente se introdujeron en la cámara de deshidratación con las condiciones especificada, el proceso de deshidratación finalizo a las tres horas y medias con un porcentaje de humedad del 9%.

El durazno deshidratado se observa en la figura 39, de acuerdo a las pruebas realizadas se puede concluir que no se presentó oxidación, conservó su aspecto, las rodajas del producto no se adhirieron a la superficie de la bandeja ya que su espesor era de 5 mm aproximadamente. Se presentó una deshidratación lenta ya que la velocidad del aire y la temperatura de la cámara eran menores a la prueba realizada anteriormente, permitiendo que se evapore tanto su humedad libre, como la ligada, sin sellar la superficie del producto.

CONCLUSIONES

Se partió desde los factores de diseño encontrados en los antecedentes, para el dimensionamiento y construcción del equipo de deshidratación, estos datos se ajustaron a las condiciones requeridas, por medio de balances de masa y energía e hidráulica, lo cual permitió un buen funcionamiento del equipo al momento de llevar a cabo la deshidratación de durazno.

Por medio del método Electra se logró, evaluar y seleccionar el deshidratador óptimo a diseñar, teniendo en cuenta factores como sistema de control, se encontró que el deshidratador de bandejas es el apropiado ya que se adapta a las condiciones establecidas y presenta una buena relación costo beneficio, en comparación a las otras alternativas.

Mediante pruebas preliminares del equipo se logró estandarizar un flujo de aire para el proceso de deshidratado de durazno de 4 m/s. La velocidad de secado debe ser baja con el fin de que el flujo de aire caliente ingrese lentamente a la cámara de deshidratación y así el producto no se vea afectado por una alta temperatura al inicio de la operación.

RECOMENDACIONES

- Tener en cuenta las condiciones ambientales del lugar donde se va operar el equipo.
- Se recomienda realizar una primera corrida al equipo sin materia prima, con el fin de verificar que los sensores y el control del deshidratador se encuentran funcionando debidamente.
- La compuerta para control de flujo de aire, no se debe encontrar cerrada en su totalidad ya que se daría un equilibrio dinámico en el sistema, el cual no permite el constante flujo de aire en el interior de la cámara de deshidratación.
- Realizar una modificación en la balanza del equipo con el fin de mejorar la exactitud del mismo.
- El sistema de control se puede mejorar en un futuro si se presenta algún fallo ya que cuenta con los puertos de programación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, M. (2012). Manual de operaciones y prácticas, Secador por lecho fluidizado. In g. S. A. d. C.V (Ed.).
- Arevalo, S. (2017). *Agua en los alimentos*. (INGENIERON EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS), UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA, QUITOS - PERU.
- ASTM, I. (2014). A36/A36M – 14 Standard Specification for Carbon Structural Steel.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of Foods*: Springer US.
- Blanco, A. R. G., & Segura, J. S. (2017). Diseño y construcción de un deshidratador solar para fresa. *Jovenes en la ciencia*, 3.
- Casaca, Á. D. (2005). Guías tecnológicas de frutas y verduras In E. Sierra (Ed.): PROMOSTA
- Cruz, O. C. (2014). *Tipos de secado en alimentos* Universidad autónoma agraria "Antonio Narro", Buenavista, saltillo, Coahuila, México.
- Chiquillo, A. R., & Diaz, A. F. P. (2010). *Desarrollo de un prototipo de una máquina de secado para frutas tropicales*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, Bucaramanga.
- Dagde, Nmegbu, K. K. a., & Jacob, C. G. (2014). Mathematical modeling of a tray dryer for the drying of potato chips using hot air medium. *International Journal of Advancements in Research & Technology, Volume 3(7)*, 104-107.
- Damodaran, S., & Fennema, O. R. (2010). *Fennema, química de los alimentos*: Editorial Acribia, S.A.
- Dergal, S. B. (2006). *Química de los alimentos*: Pearson Educación.
- 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.
- Félix, L. K. B. (2010). *diseño e implementación de un controlador para la fase de calentamiento y enfriamiento sensible del banco de psicrometría*. Pontificia universidad católica del Perú, Lima, Perú.
- Fermín, J. L. B., & Erices, V. M. (2004). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL EN EL ESTADO AMAZONAS*. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, Venezuela.
- Gascón, A., Muravnick, N., & Andreuccetti, C. (2013). *Desecación y deshidratación de vegetales*. Chacras de Coria - Mendoza.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*: Compañía Editorial Continental.
- Golisz, E., Jaros, M., & Kalicka, M. (2013). Analysis of conventional drying process of peach. *Technical Sciences*, 16(4), 10.
- Ibarz, A., & Barbosa-Canovas, G. V. (2005). *operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos* España.
- Ibarz, A., & Ribas, A. I. *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa Libros.
- Ibarz, A., & Ribas, A. I. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa.

- ICBF, & FAO. (2014). *Hoja de Balance de Alimentos Colombiana*. Bogota.
- Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2011). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits* (Vol. 3): Sachin V. Jangam, Chung Lim Law and Arun S. Mujumdar.
- Jiménez, A. D. (2014). *Diseño de un sistema de secado y separación de impurezas para polen apícola en Colombia.*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Jiménez, A. M. J., & Pinos, A. A. r. (2014). *Diseño y construcción de un secador tipo bandejas para biomasa requerido por el cestta-epoch*. Escuela superior politécnica de chimborazo, Riobamba-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
- Lozano, L., & Ortiz, D. (2016). *Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snaks para ecovitale orgánico*. Fundación Universidad de América, Bogotá, DC.
- Mahecha, P. V., & Parra-Coronado, A. (2011). Designing, constructing and evaluating a dynamic prototype dryer for obtaining rolled dehydrated fruit pulp. *Ingeniería e investigación*, 31, 163-170.
- Maupoey, P. F., Grau, A. M. A., Barat Baviera, J. M., & Albors Sorolla, A. M. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. España Universitat Politècnica de València.
- Maupoey, P. F., Grau, A. M. A., Sorolla, A. M. A., & Baviera, J. M. B. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*: Editorial U.P.V.
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition*: Taylor & Francis.
- Pelentir, N., Block, J. M., Monteiro Fritz, A. R., Reginatto, V., & Amante, E. R. (2011). Production and Chemical Characterization of Peach (*Prunus Persica*) Kernel Flour. *Journal of Food Process Engineering*, 34(4), 1253-1265. doi: 10.1111/j.1745-4530.2009.00519.x
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2001). *Manual del ingeniero químico*: McGraw-Hill.
- Pinzón, E., Cruz, A., & Fischer, G. (2014). ASPECTOS FISIOLÓGICOS DEL DURAZNERO (*Prunus persica* [L.] BATSCH) EN EL TRÓPICO ALTO. UNA REVISIÓN. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 401-411.
- 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/rcch.2017v11i1.6140
- Ratti, C. (2009). *advances in food dehydration*
- Reyes, J. S. A. (2011). *Diseño y construcción de un secador de bandejas para la obtención de extractos crudos de macromicetos comestibles*. Instituto politécnico nacional Mexico.
- Rockland, L., & Nishi, S. (2006). Fundamentals of water activity. In N. Court (Ed.), *Decagon Devices*. Pullman, Washington.
- Saravacos, G., & Kostaropoulos, A. E. (2015). *Handbook of Food Processing Equipment*: Springer International Publishing.

- Saravacos, G. D., & Kostaropoulos, A. E. (2002). *Handbook of Food Processing Equipment*
- Singh, P., & Heldman, D. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos* (J. C. Lavilla, Trans. A. press, F. Orlando & USA Eds. Segunda edición ed.). España: Acribia, S. A.
- Singh, R. P., Heldman, D. R., Bacaicoa, P. G., & Labiano, F. J. G. (1997). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*: Acribia.
- Torre, V. L. Q. d. I. (2016). *Secador de bandejas para hierbas aromaticas dedicado a la microindustria* Universidad tecnica del norte Ibarra, Ecuador.
- Treybal, R. E., & Rodríguez, A. G. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*: McGraw-Hill.
- Valdés Marín, P. (2008). Manual de deshidratación I.
- Valencia, C., Rodríguez, H., & Giraldo, G. (2011). Drying kinetics and oxidation control in Granny smith apples, through different drying methods. *Tumbaga*.
- Valverde, M. d. S. G. (2013). *Diseño de un secador de bandejar para el secado de maiz,quinua y amaranto en la hacienda san jorge.*, Escuela superior politecnica de chimborazo, Ecuador.
- Vega, A. N. (2005). *CULTIVO Y MANEJO DEL DURAZNO Prunus pérsica L.*, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, Buenavista Saltillo, Coahuila, México.