

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TEMA:

"Diseño termodinámico del proceso de deshidratación de frutas y hortalizas"

Trabajo de titulación modalidad proyecto técnico, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AUTOR: Bryan Steven Guevara Guzmán

TUTOR: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos Mg.

Ambato-Ecuador

Junio-2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del proyecto técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"DISEÑO TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE FURTAS Y HORTALIZAS"**, elaborado por el estudiante Bryan Steven Guevara Guzmán, portador de la cédula de ciudadanía número 1804916482, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, 02 de julio del 2026



Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Bryan Steven Guevara Guzmán**, con C.I. 1804916482 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente proyecto técnico con el tema: **"DISEÑO TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto técnico, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, 02 de julio 2026



Bryan Steven Guevara Guzmán

C.I. 1804916482

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este proyecto técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, 02 de julio 2026



Guevara Guzmán Bryan Steven

C.I. 1804916482

AUTOR

APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del proyecto técnico, realizado por el estudiante **Bryan Steven Guevara Guzmán**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **"DISEÑO TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS"**

Ambato, 02 de julio 2026

Para constancia firma:

Ing. Jorge Guamanquispe, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR

Ing. Juan Paredes, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico este producto de esfuerzo y perseverancia a mi madre, por darme la oportunidad de estar presente en este mundo lleno de cosas increíbles por conocer y descubrir, a mis hermanos por estar siempre presentes apoyándome a lo largo de mi vida, a mi abuelo por haber sido parte fundamental de mi aprendizaje en cuanto a principios y valores, y sobre todo a mi persona, por nunca haberme dado por vencido a pesar de todas las ocasiones en las que la vida me puso a prueba.

AGRADECIMIENTO

Agradecido con la vida por estar aquí, por tener salud y bienestar; a cada una las personas que me brindaron sus conocimientos, y que a su tiempo forjaron una pequeña parte de todo lo que sé y soy ahora, a mis amigos, con los que compartí grandes experiencias a lo largo de esta etapa, y en general, a todos aquellos individuos que aportaron positivamente en mi desarrollo profesional. ¡Gracias totales!

INDICE

PORTADA i
APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTO vii
INDICE viii
INDICE DE TABLAS x
INDICE DE FIGURAS xi
RESUMEN EJECUTIVO xv
ABSTRACT xvi
CAPITULO I 1
MARCO TEÓRICO 1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS 1
1.1.1. Antecedentes históricos 1
1.2. JUSTIFICACIÓN 6
1.3. OBJETIVOS 7
1.3.1. Objetivo general 7
1.3.2. Objetivos específicos 7
1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 7
1.4.1. Fundamentos de transferencia de calor para la deshidratación 7
1.4.3. Energía interna 11
1.4.4. Calor específico 12
1.4.5. Contenido de humedad 12
1.4.6. Parámetros y características que influyen en el diseño del proceso termodinámico de deshidratación 14
1.4.7. Selección de alternativas 14
1.4.8. Equipamientos para el proceso de deshidratación. 18
1.4.9. Propiedades del tomate de riñón 21
CAPÍTULO 2 25

METODOLOGÍA 25
2.1. Materiales 25
2.2. MÉTODOS 26
2.2.1. Metodología 26
2.2.2. Diagrama de Flujo del proyecto 29
2.2.3. Criterios de evaluación para selección de alternativas 31
CAPITULO 3 32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 32
3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 32
3.1.1. Parámetros y variables para el diseño termodinámico 32
3.1.2. Propiedades del entorno deshidratador 34
3.1.3. Grosor de corte adecuado para la deshidratación 35
3.1.4. Cálculo de la capacidad máxima de tomate de riñón deshidratado 35
3.1.5. Temperatura de deshidratación 37
3.1.6. Velocidad del aire 38
3.1.7. Identificación del tiempo de secado mediante datos proporcionados por análisis de laboratorio 40
3.1.8. Transferencia energética hacia el tomate de riñón 42
3.1.9. Transferencia energética en el proceso de deshidratado del tomate a temperatura constante 43
3.1.10. Cálculo de la Potencia en función de la cantidad de tomate maduro 45
3.1.11. Cálculo del caudal de aire requerido para el sistema 46
3.1.12. Coeficiente de transferencia de calor por convección 48
3.1.13. Tiempo de deshidratado bajo las condiciones impuestas por la máquina 49
3.1.14. Curvas de Secado 50
3.1.15. Parámetros Finales del diseño 55
CAPITULO 4 56
CONCLUSIONES 56
RECOMENDACIONES 57
BIBLIOGRAFÍA 58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición química promedio del tomate de riñón [20], [21]. 21
Tabla 2: composición química y nutricional del tomate en base a una porción especificada [21], [22]. 22
Tabla 3: criterio de clasificación en base al peso del tomate de riñón [20]. 23
Tabla 4: descripción de los materiales usados para el diseño termodinámico. 25
Tabla 5: ponderación para la selección de la alternativa de deshidratado más adecuada para el tomate de riñón. 31
Tabla 6 : propiedades atmosféricas de acuerdo con diversas altitudes [10]. 32
Tabla 7 : características psicrométricas de la ciudad de Ambato [28]. 34
Tabla 8 : datos correspondientes a una muestra de diez valores para la obtención de un valor de velocidad promedio del aire. 39
Tabla 9: propiedades del agua saturada a diferentes presiones [24]. 44
Tabla 10 : resultados del cálculo con un valor de potencia suministrada de 1.6. kW..... 49
Tabla 11: datos obtenidos del proceso de deshidratación del tomate en un periodo de 8 horas 52
Tabla 12: resultados identificados en base al certificado no. 25-006-a de análisis de laboratorio de una porción de 100g de tomate deshidratado. 55
Tabla 13: Parámetros finales de diseño para el proceso de deshidratación del tomate de riñón. 55

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1:Esquema del proceso de deshidratación por bandejas [3]. 3
Fig. 2:Partes de un colector solar convencional [5] 4
Fig. 3:Esquema de los ductos por los cuales se realiza la circulación del aire seco hacia los alimentos que se van a deshidratar [5]. 4
Fig. 4:Esquema de un secador de lecho fluidizado con sus respectivas partes: A: Calefactor, B: puerto de muestreo, C: ventana, D: cámara de fluidización, E: motor de frecuencia variable, F: ciclón, G: soplador centrífugo [6]. 5
Fig. 5:Diagrama que representa el proceso de secado por cámara de vacío [7]. 5
Fig. 6: Esquematización gráfica de los mecanismos de transferencia de calor por A: Convección, B: Conducción, C: Radiación [9]. 9
Fig. 7:Disposición de las bandejas de secado en el ambiente [1]. 19
Fig. 8: Bandejas y collares de secado instalados estratégicamente para aprovechar el aire caliente de un medio circundante [1]. 20
Fig. 9: Flujograma del proyecto en base a las actividades planteadas. 30
Fig. 10: Rango de temperaturas promedio diarios para la ciudad de Ambato [28]. 33
Fig. 11: Humedad relativa promedio para la ciudad de Ambato [28]. 33
Fig. 12: Temperatura de punto de rocío para la ciudad de Ambato [28]. 34
Fig. 13: Deshidratador usado para el análisis y toma de datos. 35
Fig. 14: Dimensiones de las bandejas existentes en el deshidratador. 36
Fig. 15: Distribución de las rodajas de tomate en la bandeja del deshidratador. 36
Fig. 16: Anemómetro ubicado a una distancia media del volumen de control y perpendicular al eje de los ventiladores. 39
Fig. 17: Ecuaciones de los coeficientes de transferencia de calor por convección en función de la velocidad del aire circundante y las condiciones de flujo de aire [12]. 48
Fig. 18: Peso de las tres primeras muestras de tomate a deshidratar, cada uno con 48 rodajas de tomate distribuido en la bandeja del deshidratador. 50
Fig. 19: Distribución de rodajas de tomate en las bandejas del deshidratador. 51
Fig. 20: Bandejas con las rodajas distribuidas en el deshidratador. 51

Fig. 21: Peso de la funda plástica medido en una balanza de precisión, que sirve como recipiente de medición. 52
Fig. 22: Curva de secado del tomate de riñón, muestras de pesos similares y su reducción de humedad en función del tiempo.....53
Fig. 23: Porcentaje de humedad removida del tomate de riñón a lo largo del proceso de deshidratado para cada muestra. 54

Glosario de Términos

Q_s: Energía o calor sensibles, expresada en (kJ)

m: Masa de material a calentar, en (kg)

Cp: Calor específico característico del material o alimento en $(kJ/kg°C)$

ΔT: Variación de temperatura $°C$

Q_l: Calor latente del sistema expresado en (kJ)

h_{fg}: Expresión que representa el calor latente de vaporización, en (kJ/kg)

m_h: Masa total del alimento.

m_s: masa en base seca.

m_{H_2O}: masa de agua.

$\%H_{bs}$: Representa el procentaje del contenido de humedad de base seca del alimento.

$\%H_{bh}$: Simbología que identifica el contenido de base húmeda en un porcentaje determinado.

ρ_T: Densidad del tomate expresada en kg/m^3.

$A_{Rodajas\ tomate}$: Área de las rodajas de tomate en m^3

T_1: corresponde a la temperatura en el interior de la cámara de secado en $°C\ o\ K$

T_∞: Temperatura promedio del medio circundante $°C\ o\ K$

Cp: Calor específico en kJ/kgK

R: representa el rendimiento o factor de masa de agua deshidratado

H_i: Humedad inicial del fruto antes de la deshidratación

H_s: Humedad después del proceso

P_e: Peso entrada del alimento en kg.

P_s: Peso de salida del alimento, después del proceso de secado en kg.

$\dot{Q}$: Potencia requerida para llegar a la temperatura de equilibrio en kW.

t: tiempo en el cual el fruto llega a la temperatura de equilibrio en horas.

t_d: tiempo de Deshidratado a temperatura constante en horas

t_T: Tiempo total de deshidratado en horas

$\dot{Q}$: Potencia requerida del sistema para el calentamiento del fruto en kW

$\dot{m}_a$: Flujo másico del aire, expresado en kg/s

Cp_a: Calor específico del aire a presión constante $1.005\ kJ/kgK$.

ΔT: Variación de temperatura entre la entrada y salida del aire.

ρ_a: Densidad del aire a la altura de 2580 m.s.n.m. en kg/m^3

$\dot{V}$: Flujo volumétrico del aire en m^3/s

h_c: coeficiente de transferencia de calor por convección W/m^2K

V: Velocidad del aire circundante en m/s

RESUMEN EJECUTIVO

La deshidratación de alimentos constituye uno de los métodos de conservación más utilizados en la actualidad, ya que permite reducir el contenido de humedad, prolongar la vida útil de los productos y disminuir las pérdidas económicas postcosecha. En este contexto, el presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar el diseño termodinámico del proceso de deshidratación de frutas y hortalizas mediante aire caliente forzado, tomando como caso de estudio el tomate de riñón (*Solanum lycopersicum*).

El proyecto se desarrolló a partir de una investigación bibliográfica sobre los principios de transferencia de calor y masa aplicados al secado de alimentos. Además, se realizó un análisis comparativo de las tecnologías de deshidratación existentes con el fin de seleccionar la mejor alternativa. Complementariamente, se determinaron las propiedades físicas y químicas del tomate de riñón, las condiciones psicrométricas de la ciudad de Ambato y las características operativas del deshidratador empleado como referencia para el diseño.

La información recopilada permitió efectuar los cálculos termodinámicos necesarios para establecer parámetros de operación como temperatura de deshidratado, capacidad de carga, transferencia de energía y condiciones de circulación de aire. A partir de estas variables se elaboraron curvas de secado en función del tiempo, permitiendo describir el comportamiento de eliminación de humedad del fruto. Dando como resultado una metodología de diseño aplicable a sistemas de deshidratación por aire caliente forzado, constituyéndose en una referencia técnica para futuras aplicaciones en el procesamiento y conservación de frutas y hortalizas, y favoreciendo el aprovechamiento de productos agrícolas mediante tecnologías de fácil implementación y control operativo.

Palabras Clave: DISEÑO TERMODINÁMICO, DESHIDRATACIÓN, AIRE CALIENTE FORZADO, TRANSFERENCIA DE CALOR, CONDICIONES PSICROMÉTRICAS.

ABSTRACT

Food dehydration is one of the most widely used preservation methods today, as it reduces moisture content, extends product shelf life, and minimizes post-harvest economic losses. In this context, the objective of this project was to develop the thermodynamic design of the dehydration process for fruits and vegetables using forced hot air, taking tomato (*Solanum lycopersicum*) as the case study.

The project was developed through a comprehensive literature review on the principles of heat and mass transfer applied to food drying. In addition, a comparative analysis of existing dehydration technologies was conducted in order to select the most suitable alternative. Furthermore, the physical and chemical properties of tomato, the psychrometric conditions of the city of Ambato, and the operational characteristics of the dehydrator used as design reference were determined.

The collected information enabled the thermodynamic calculations required to establish operating parameters such as drying temperature, loading capacity, energy transfer, and air circulation conditions. Based on these variables, drying curves were developed as a function of time, allowing the description of the fruit's moisture removal behavior. As a result, a design methodology applicable to forced hot-air dehydration systems was established, serving as a technical reference for future applications in the processing and preservation of fruits and vegetables, while promoting the efficient utilization of agricultural products through technologies characterized by simple implementation and operational control.

Keywords: THERMODYNAMIC DESIGN, DEHYDRATION, FORCED HOT AIR, HEAT TRANSFER, PSYCHROMETRIC CONDITIONS.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

A lo largo de la historia el ser humano se ha caracterizado por su capacidad intelectual para llevar a cabo un desarrollo sostenible de la sociedad, todo esto en base a diversos factores como el desarrollo tecnológico, industrial, pero por sobre todo alimenticio. Proporcionando al mismo una mejor calidad de vida gracias a un correcto tratamiento y manejo de los alimentos que este es capaz de producir y posteriormente procesar.

1.1.ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1. Antecedentes históricos

El desarrollo de la industria alimenticia a lo largo de los años ha permitido un gran impulso en lo que corresponde a la innovación del tratamiento y adecuación de productos acorde a las situaciones geográfica, climática e incluso de suelo en el cual se cultiven los distintos alimentos que son consumidos en la actualidad. Dentro de este campo, se especifica a los alimentos deshidratados, el tomate de riñón en particular, como tema principal de la investigación, al denotar su gran popularidad y acogida que tienen hoy en día.

Partiendo de este punto, se pueden identificar ciertos aspectos que definen de mejor forma este proceso de tratamiento de los alimentos, como, por ejemplo, aquel en el que se menciona el mismo como un proceso de eliminación de agua de las frutas y hortalizas a través de la interacción de este por calor artificial, esto según el artículo de revista “deshidratación de frutas, hortalizas y hongos” [1]. En dicho documento se pueden denotar algunos de los principios básicos que rigen este proceso, entre los que se pueden destacar: la velocidad de secado, temperaturas, el volumen de control, entre otros. Todos estos ítems son de vital importancia, ya que el enfoque de diseño requiere de ciertas variables que delimiten las condiciones óptimas de deshidratación.

Los conceptos y temas principales para recopilar tienen como objetivo el brindar un compendio con información técnicamente detallada en el cual se establecen los parámetros adecuados que intervienen en el proceso, razón por la cual, para estar más al tanto del tema, se mencionan algunos de los distintos tipos de deshidratación usados comúnmente en la industria alimenticia acorde a su nivel de efectividad e importancia en este campo.

Para sustentar correctamente la metodología de deshidratación que se seleccionará para el estudio, se parte desde los primeros indicios referentes a este tipo de conservación de alimentos, el cual se remonta desde hace los primeros indicios de civilización humana, teniendo un registro aproximado que se remonta al año 20000 a. C [2]. Vestigios de procesos de secado de alimentos se registran en culturas orientales, de las cuales se destacan la conservación de semillas mediante la exposición al sol de estas. En regiones pertenecientes al continente europeo, sur de Francia para ser más específicos, se tiene la evidencia de un antiguo pueblo denominado Solvieux, del cual se tiene conocimiento acerca del procesamiento y de secado de productos procedentes del mar, como el pescado seco, el cual de la misma forma que el ejemplo anterior era expuesto al sol con el fin de deshidratarlo para conservar la carne por mucho más tiempo [2]. En otras etapas de la historia de la humanidad, tales como en el 2800 a. C. en la región de lo que hoy es medio oriente, (Egipto) se tiene indicios de conservas de alimentos y frutos secos como nueces, uvas, manzanas, dátiles, entre otros [2]. En la edad media, aproximadamente en el periodo del 630 d. C. al 1630 d. C. el pueblo mongol sustenta la invención de la leche en polvo, producto de la exposición de esta al sol [2]. A fines de la segunda guerra mundial, se enfatizó el desarrollo de los procesos de secado hasta los que se puede encontrar comúnmente en la actualidad, tales como: secado en bandejas, secado por aspersión, secado en lecho fluidizado, secado al vacío y liofilización, entre otros.

Algunos de los procesos de deshidratación o secado anteriormente mencionados se pueden explicar de una manera más detallada, como es el caso del secador de Bandejas, el cual consiste en un grupo de bandejas en las cuales se depositan los alimentos a ser deshidratados, los que, a su vez, son expuestos a una ráfaga de aire caliente a velocidad y

temperatura constante, las cuales, oscilan de entre 1-10m/s y menor a 60° [3]. Generalmente el calentamiento del medio circundante se realiza mediante resistencias eléctricas, y su respectivo flujo va de la mano con ventiladores de hélice o centrífugos. En la fig. 1 se puede ver como el calor transmitido hacia los alimentos secados se considera como directa por la forma en la cual está conformado el sistema [3].

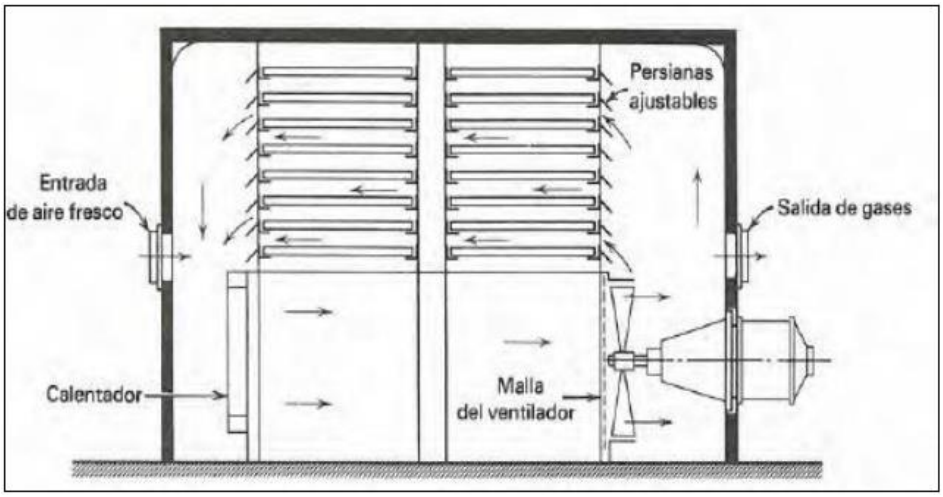


Fig. 1:Esquema del proceso de deshidratación por bandejas [3].

Continuando con los métodos de deshidratación, se menciona brevemente al secado por aspersión, en el cual consiste en el ingreso de un alimento en una cámara de secado, en este caso de forma líquida, el que posteriormente se atomiza, permitiendo evaporar la humedad sin perder la calidad ni gran parte de los valores nutricionales del alimento en caso de que este sea sensible al calor. El proceso dentro del conjunto consta de un corriente de aire caliente que choca con las partículas asperjadas, las cuales pierden humedad por efecto de la interacción con la temperatura del aire anteriormente mencionado; ocasionando un choque en las paredes de la cámara para finalmente pasar a un separador ciclónico que se encarga de encapsular dichas partículas [4].

Deshidratado por energía solar térmica, el cual consiste en el proceso de deshidratación de alimentos mediante la circulación de aire caliente, lo que a su vez mejora la calidad y resistencia del producto ya que impide la proliferación de bacterias, las cuales requieren

de humedad para desarrollarse. Desde el punto de vista termodinámico se puede definir como un proceso de transferencia de calor y masa desde el aire caliente circundante hasta el alimento que se quiere secar, lo que al final resulta en el aumento de la humedad relativa del aire y la disminución de la temperatura de bulbo seco del mismo [5].

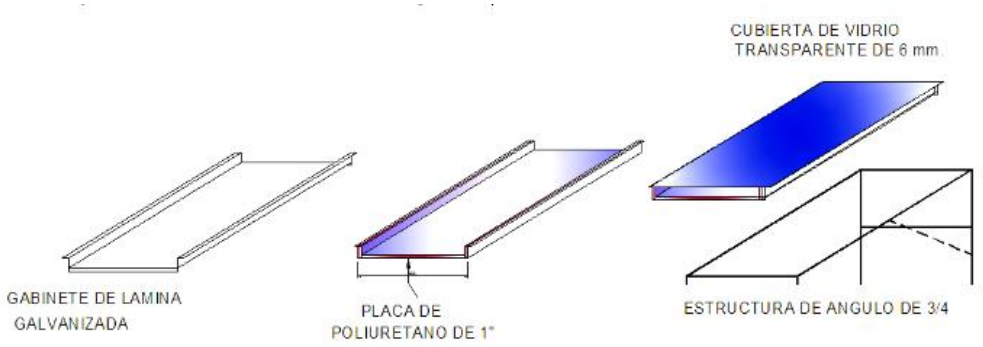


Fig. 2:Partes de un colector solar convencional [5]

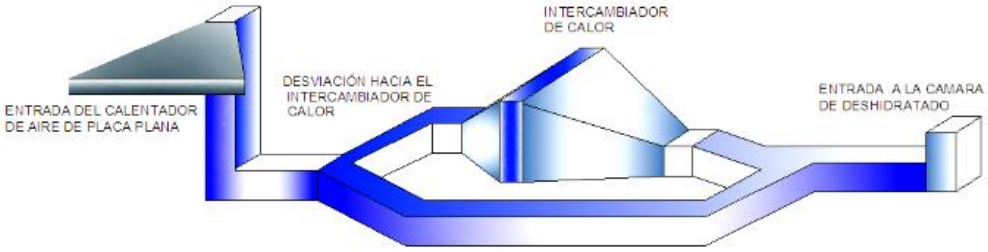


Fig. 3:Esquema de los ductos por los cuales se realiza la circulación del aire seco hacia los alimentos que se van a deshidratar [5].

El secado por lecho fluidizado radica en un sistema de ingreso de aire hacia una cámara de secado mediante una placa giratoria con cierta cantidad de superficie o espacio libre, fig. 4 lo que permite la fluidización en el conjunto. Este proceso generalmente consta de un soplador centrifugo, un calefactor eléctrico y un “sistema de toma de muestra consistente en un ciclón con un filtro de bolsa como unidad de respaldo” [6]. Su eficiencia resulta ser mayor a la del secado por bandejas.

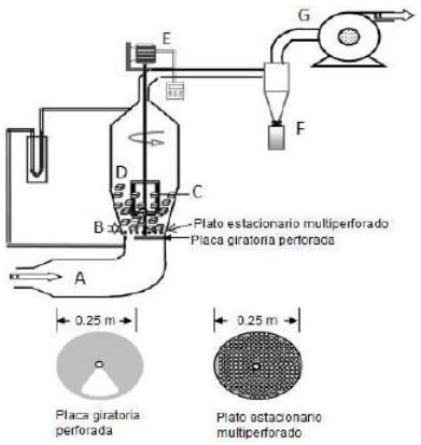


Fig. 4:Esquema de un secador de lecho fluidizado con sus respectivas partes: A: Calefactor, B: puerto de muestreo, C: ventana, D: cámara de fluidización, E: motor de frecuencia variable, F: ciclón, G: soplador centrífugo [6].

El secado en cámara de vacío se caracteriza por el tratamiento de los alimentos a una presión menor a la atmosférica. En dicho conjunto se requieren temperaturas y tiempos menores que en condiciones ambientales, además de que su fuente de calor puede ser proporcionada por resistencias eléctricas, colectores solares, microondas, entre otros [7].

En la fig.5 se puede evidenciar el diagrama que muestra el proceso de funcionamiento de este tipo de secado, en el cual el primer paso consiste en disminuir la presión de la cámara por medio de una bomba de vacío, seguido del calentamiento del entorno mediante cualquiera de los métodos anteriormente descritos por un tiempo determinado; y siendo estos monitoreados por un ordenador que recibe señales de dispositivos y sensores implantados en el sistema [7].

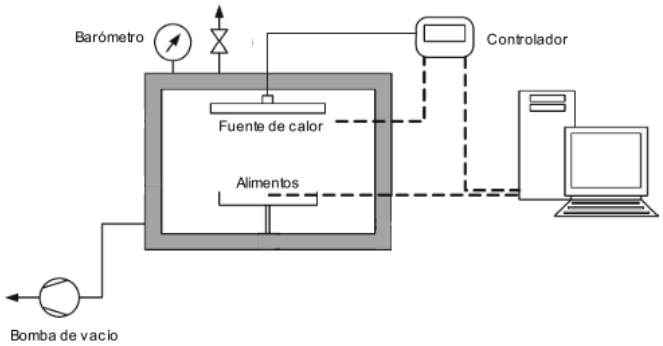


Fig. 5:Diagrama que representa el proceso de secado por cámara de vacío [7].

Todos los ejemplos antes mencionados representan los diferentes métodos existentes correspondientes al deshidratado de alimentos que se han venido desarrollando a lo largo del tiempo. Para el caso en particular del cual se va a realizar el diseño y la toma de datos, se pretende realizar un método de ponderación cualitativo, además de identificar la disponibilidad de los equipos presentes en el laboratorio de la universidad, todo esto con el fin de llevarse un proceso adecuado y acorde a los resultados obtenidos en el transcurso de esta investigación.

1.2.JUSTIFICACIÓN

A lo largo de la historia, desde que el ser humano fue capaz de desarrollar y perfeccionar la agricultura, ha sido participe de un sinnúmero de invenciones que le han permitido facilitar ciertos procesos de producción y conservación de alimentos, a partir del almacenamiento de granos secos, la elaboración de harinas, hasta los procesos industriales presentes en la actualidad, tales como el enlatado, deshidratación, ahumado, congelación, envasado y el uso de aditivos alimentarios, como antioxidantes y conservantes [8], los cuales no solo que conservan dichos alimentos, sino que también permiten proporcionar un valor agregado al producto final a comercializarse.

Considerando el caso particular de deshidratación como medio de conservación de los alimentos, podemos definir a este como un proceso de eliminación de agua y humedad de un cuerpo mediante la exposición de este por calor artificial, el cual puede ser suministrado por diversas fuentes como aire o superficies calientes, o la simple exposición al ambiente, estando las mismas entre las más comunes dentro de este sector [1]. Además de esto, se destaca la importancia de la elaboración de un análisis previo, en base a datos y experimentaciones realizadas por fuentes de confianza, que permitan identificar los distintos parámetros térmicos que intervienen en la deshidratación de los alimentos, de acuerdo con sus respectivas características y morfología en particular.

El presente proyecto, tiene como principal enfoque el desarrollo y estudio de los diversos factores que influyen en el proceso de deshidratación de frutas y hortalizas, partiendo

desde aquellos que tienen que ver con su configuración física, sus porcentajes de humedad y morfología, y llegando hasta su comportamiento conforme se expongan a diversas temperaturas con el fin de determinar las condiciones óptimas para una correcta deshidratación sin que se pierdan las propiedades nutricionales de dichos alimentos. Todo esto en base a un enfoque termodinámico centrado en la transferencia de calor y sus distintas ramas, los cuales, por motivos prácticos, se realizarán mediante softwares que permitan recrear de la forma más aproximada posible, el comportamiento de cada elemento a ser estudiado en esta investigación.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar termodinámicamente el proceso de deshidratación de frutas y hortalizas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros que influyen en la deshidratación de frutas y hortalizas partiendo de documentos técnicos y fuentes bibliográficas que aborden el tema.
- Calcular variables físicas como la cantidad de calor y tiempo requerido para una correcta deshidratación.
- Realizar las curvas de secado a partir de los resultados teóricos calculados y los obtenidos en la máquina deshidratadora presente en el laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica.

1.4.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.4.1. Fundamentos de transferencia de calor para la deshidratación

La deshidratación trae consigo un conjunto de variables que son producto de la transferencia de calor que se manifiesta en el proceso. Estas dependen de distintas

condiciones ambientales, atmosféricas y del producto a secar, pero generalmente se pueden clasificar en factores externos e internos.

Factores externos: presión, temperatura, porcentaje de humedad y velocidad del aire del medio de secado.

Factores internos: Corresponden a aquellos que permiten el transporte de agua hacia la superficie del fruto u hortaliza deshidratada. Entre estos se tiene al fenómeno de degradación al trabajarse a altas temperaturas con respecto a los alimentos.

1.4.2. Velocidad de secado

Corresponde a la velocidad con respecto al tiempo de secado en el que tarda un alimento en llegar a las condiciones ideales de deshidratado. Esta depende de ciertos factores a considerar que se enlistan a continuación:

- Velocidad del aire seco circundante
- Migración de agua y solutos del alimento
- El tiempo en el cual el vapor de agua se elimina de la superficie.
- Relación cantidad de alimento/medio de deshidratación
- Temperaturas máximas recomendadas de secado del alimento en específico, en este caso del tomate.
- El tiempo y velocidad de evolución del deterioro por oxidación, pardeamientos, perdida de vitaminas, entre otros.
- La formación de costras de características impermeables en la superficie del producto deshidratado.

El proceso de secado en un cuerpo es producto de la reducción del contenido acuoso del mismo mediante la interacción de transferencia de calor entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, generando una variación de esta, lo que ocasiona la pérdida de humedad del alimento a ser deshidratado. Dicho fenómeno ocasiona a un movimiento de agua en el

alimento por medio de diversos mecanismos como fuerzas capilares, difusión superficial, de líquido y vapor Para el caso del secado, el movimiento del líquido en el interior del fruto y el movimiento de vapor hacia la superficie son consecuencia de la transferencia de calor por medio de la conducción, convección o radiación [9]. En la figura 5 se presenta un esquema gráfico del funcionamiento de la transferencia de calor desde los diferentes tipos de transferencia de calor mencionados.

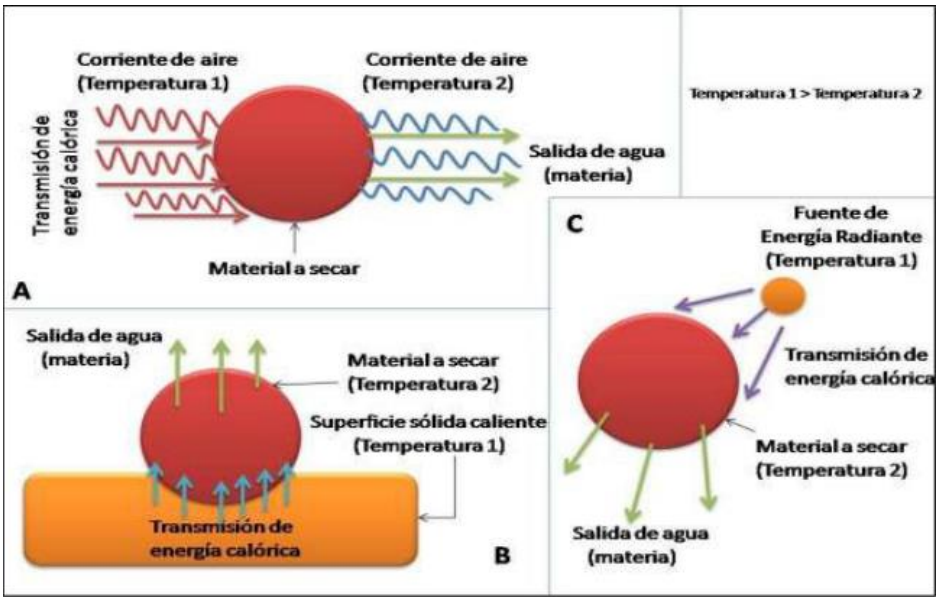


Fig. 6: Esquematización gráfica de los mecanismos de transferencia de calor por A: Convección, B: Conducción, C: Radiación [9].

Los procesos de deshidratación descritos con anterioridad se pueden definir de la siguiente manera:

Conducción: esta no es más que la transferencia de energía entre las partículas más energéticas de un cuerpo hacia las partículas menos energéticas adyacentes. En los sólidos se debe al transporte de los electrones libres y la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula. Mientras que en los gases y líquidos esta ocurre por las colisiones y difusión de las moléculas del cuerpo durante los movimientos aleatorios de las mismas [10].

Para que exista conducción en el proceso de deshidratado, se debe tener contacto directo con el alimento por medio de superficies calientes, lo que logra una pérdida mínima en cuanto a entalpía; dando como resultado un proceso de transferencia de calor más eficiente que por convección y radiación [9].

Convección: Se define como la transferencia de energía entre una superficie sólida y el gas o líquido adyacente generada por el movimiento molecular de las partículas. Dicho movimiento es resultado de fracciones del fluido accionadas por una fuerza externa como el gradiente de densidad para la convección natural, o resultado de una diferencia de presión ocasionada por una bomba, ventilador, o la combinación de estos. Mientras más rápido sea este flujo, se logra una mayor transferencia de calor [11], [10].

En el secado de alimentos por convección, se suministra una corriente de gas caliente y seco, que generalmente es aire caliente hacia el producto de forma directa, con el objetivo de eliminar la humedad presente en el mismo [9].

Radiación: la radiación se define como la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas debidas a los cambios en la configuración electrónica de los átomos y moléculas, en esta no es necesaria la presencia de un medio interventor que permita la transferencia de calor. Existen diferentes tipos de radiación generados por rayos x, rayos gamma, ondas de radio, televisión, microondas, entre otros, que no serán tomados al caso, a excepción de la radiación térmica emitida por un cuerpo debido a su temperatura [10], [11].

Para la deshidratación de frutas y hortalizas, el estudio de la radiación tiene que ver con el proceso de evaporación de la humedad del alimento por medio de energía radiante y ondas electromagnéticas. Después de un tiempo se requiere menos energía para el secado del alimento una vez que esta es absorbida por las moléculas de agua salientes [9].

1.4.3. Energía interna

La energía interna, en términos referentes a los alimentos, corresponde a la estructura y actividad molecular presente em un sistema. Se denota por la letra U y se define en términos de unidad de masa, siendo el J (joule) para el sistema internacional, y BTU $(British\ Thermal\ Unit)$ para el sistema inglés. Dicha energía es la suma de las interacciones entre la energía cinética y potencial de las moléculas existentes en el medio que analizado [10], [12].

Energía o calor sensibles: esta tiene que ver con la energía cinética de las moléculas. Su actividad y velocidad están en proporcionalidad con la variación de temperatura a la cual se expongan, ocasionando una separación molecular y un posterior cambio de fase. Dichos procesos indican una interacción de transferencia de calor y energía, ya sea de calentamiento o enfriamiento [10], [12]. La expresión que permite el cálculo del calor sensible es:

$$Q_s = mCp\Delta T \tag{1}$$

Donde:
Q_s: Energía o calor sensibles, expresada en (kJ)
m: Masa de material a calentar, en (kg)
Cp: Calor específico característico del material o alimento en $(kJ/kg°C)$
ΔT: Variación de temperatura $°C$

Energía o calor latentes: Está asociada con la fase de un sistema y su cambio de estado, en donde la temperatura permanece constante, lo que imposibilita la transferencia de calor por variación de temperatura. El calor latente de vaporización es comúnmente usado en los cambios de estado de líquido a vapor [10], [12]. La fórmula que permite su cálculo es:

$$Q_l = m(h_{fg}) \tag{2}$$

En donde:

Q_l: Calor latente del sistema expresado en (kJ)

m: Masa de agua que se va a evaporar (kg)

h_{fg}: Expresión que representa el calor latente de vaporización, generalmente identificado en bibliografías referentes a termodinámica y transferencia de calor [10], [11]. Se expresa en (kJ/kg)

1.4.4. Calor específico

Se define como la cantidad de energía requerida para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia [10].Este se presenta de acuerdo con dos variables fundamentales de cálculo del cual depende su especificación, dichas variables son el volumen y la presión [12]. Las unidades para el calor específico, sea a volumen o a presión constante, son $(kJ/kg°C)$ o (kJ/kgK).

Calor específico a volumen constante (Cv): Como su nombre lo indica consiste en realizar el concepto de calor especifico previamente mencionado con la única condición de que el volumen en el cual se trabaja sea constante [10].

Calor específico a presión constante (Cp): La diferencia con el calor especifico a volumen constante radica en que, para este caso, la condición establece que la presión sea constante [10].

Un aspecto importante para considerar con respecto a los calores específicos es la expresión $Cp > Cv$, que indica una permisibilidad en cuanto a expansión del sistema y suministro de energía al mismo [10], [12].

1.4.5. Contenido de humedad

El contenido de humedad de un alimento se define como cantidad de agua presenten en un material sólido. Esta se puede expresar en términos de masa en base seca o en masa

húmeda [13]. La masa total del del alimento es igual a la suma de su masa seca y la masa de agua.

$$m_h = m_s + m_{H_2O} \tag{3}$$

Donde:

m_h: Masa total del alimento.

m_s: masa en base seca.

m_{H_2O}: masa de agua.

Contenido de humedad en base seca:

Para este contenido de humedad, expresado en porcentaje para grandes cantidades de producto alimenticio, que compara el contenido de agua de un material o alimento con su masa de base seca [13], se tiene la siguiente fórmula:

$$\%H_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s}(100) \tag{4}$$

Donde:

$\%H_{bs}$: Representa el procentaje del contenido de humedad de base seca del alimento. En frutas y verduras, este tiende a incrementarse proporcionalmente a la masa de agua.

Contenido de humedad en base húmeda

Se define como el cociente entre masa de agua presente en el alimento y su respectiva masa total, es decir, corresponde a una fracción de esta [13].

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h}(100) \tag{5}$$

Donde:

$\%H_{bh}$: Simbología que identifica el contenido de base húmeda en un porcentaje determinado.

La expresión que se requiere para realizar el diseño termodinámico corresponde al contenido de humedad en base seca, ya que, en el proceso de deshidratado, la masa del solido se mantiene constante, mientras el cambio de contenido de humedad varia con respecto al tiempo [12]. Existe una expresión que permite identificar la equivalencia existente entre los dos tipos de humedad, la cual se describe en la siguiente formula:

$$\%H_{bs} = \frac{\%H_{bh}}{(100 - \%H_{bh})}(100) \tag{6}$$

1.4.6. Parámetros y características que influyen en el diseño del proceso termodinámico de deshidratación

El proceso de diseño correspondiente a la deshidratación de frutas y hortalizas conlleva la identificación de variables que permitan la mejor adecuación en cuanto a materiales y tamaño del conjunto. En este se deben especificar todos los criterios termodinámicos que tengan que ver con el principio de secado del fruto, partiendo de su porcentaje de humedad, tamaño óptimo para el deshidratado, conservación de valores nutricionales, grado de maduración entre otros. Todos estos puntos requieren de un análisis detallado para un correcto dimensionamiento, razón por la cual se establece que todos los temas mencionados anteriormente serán analizados a detalle en las páginas posteriores de la presente investigación.

1.4.7. Selección de alternativas

Las decisiones para la selección de alternativas se deben evaluar mediante ciertos criterios que permitan establecer un conjunto de características que se acomoden de la mejor manera al desarrollo del proyecto en sí, contribuyendo a una elección optima que a futuro

no limite el desarrollo de la investigación, además de que se resuelva de forma clara y precisa el problema que se está tratando [14].

En la actualidad existen diversos procesos de deshidratación que varían de acuerdo con el tipo de constitución y conformado del área o espacio de secado que se usa para retirar la humedad y conservar los alimentos, para los casos identificados, se puede clasificar los mismos por el medio y consumo energético que estos presenten para generar calor. Es decir, desde los que usan leña o combustibles como el gas, otros de calentamiento por resistencia eléctrica o que usen energía de la red pública para su funcionamiento, pasando por procesos de conservación a través de compuestos en base a una solución, hasta aquellos que logren el secado por medio de un volumen de control y la exposición prolongada a una fuente de luz y calor natural, es decir, al ambiente en el día [1]. También se deben especificar el tipo de exposición al calentamiento, es decir, si esta es directa a partir del gas calentado hacia los sólidos, o indirecta mediante el uso de repisas o bases precalentadas [3].

Una vez definido el concepto de selección de alternativas, para el caso de la deshidratación de frutas y hortalizas se procede con la presentación de los procesos y máquinas comúnmente usados en la industria, con el fin de identificar sus distintas características y especificaciones técnicas que se necesiten conocer. Todo esto con el objetivo de presentar una idea más clara para establecer el criterio de diseño necesario para el secado de los alimentos a ser analizados.

Deshidratador solar

Se considera un tipo de deshidratador natural. Consiste en la exposición del alimento de manera directa al sol en una superficie sin presencia de humedad o agentes contaminantes. Es la estrategia de deshidratación más común y económica que se puede encontrar, además de ser la más antigua. Sus desventajas radican en la vulnerabilidad o exposición a agentes contaminantes como polvo, proliferación de hongos, insectos, entre otros de los productos

dispuestos a secar. Este proceso generalmente tiene un promedio de duración de secado de aproximadamente 106 a 120h [15].

Una de sus variantes consiste en la aplicación de una estructura tipo túnel, en el cual se protege al alimento del ambiente mientras este se deshidrata a un promedio de temperatura de aproximadamente 60-80°C. Para este caso se tiene una medición de flujo de calor que oscila entre 202.3 a 767.4 W/m^2 [15].

La ventaja de este proceso radica en el nulo costo energético al aprovechar el calor suministrado por el sol, además de su bajo costo de construcción y operación, considerándose prácticamente ecológicos [1], [15].

Deshidratador con aire caliente forzado

Este método consiste en la remoción del agua y humedad del producto mediante la introducción de aire caliente a los alimentos a ser deshidratados. Puede ser de dos tipos, al poder generarse calor por medio de resistencias eléctricas o por una llama de gas. En este proceso se tiene control sobre la velocidad del aire, lo que a su vez permite la generación de turbulencias, conllevando a la reducción en la capa de difusión. Permitiendo que la deshidratación sea más eficiente [15].

Como principal ventaja se tiene la capacidad de controlar la temperatura a la cual se quiere deshidratar los alimentos, lo que a su vez contribuye a una disminución considerable del tiempo de secado. Este depende del fruto y sus características en particular. Como ejemplo se tiene al tomate de riñón, el cual generalmente se encuentra en in rango de 35.5 a 24 horas efectivas de deshidratado [15].

El flujo de aire en este tipo de deshidratación funciona de forma análoga a un intercambiador de calor de flujo paralelo, y flujo cruzado o de contracorriente, siendo esta última el método más adecuado en cuanto a eficiencia de secado con respecto al tiempo,

ya que, al realizar una comparación entre estos dos métodos, este logra una diferencia de hasta 5 horas menos con respecto al flujo de aire paralelo [15].

Una de las principales desventajas que presenta este proceso de deshidratación es el uso de altas temperaturas, ya que se presentan cambios significativos en las propiedades importantes del alimento como nutrientes, sabor, color, aroma, entre otros. Los cuales a su vez minimizan la calidad del producto [15].

Deshidratador por microondas

El proceso de deshidratación consiste en la penetración de microondas en el alimento, las cuales alteran las partículas polares del mismo, tales como las del agua, proteínas, entre otras[15]. Dichas partículas generan oscilaciones al tratar de alinearse, generalmente con referencia al campo eléctrico, lo que produce fricción entre moléculas que a su vez conlleva a la generación de calor. Este calor se transmite por el medio circundante, en este caso, dependiendo el fruto, ya sea por conducción o por convección, lo que posteriormente garantiza una temperatura uniforme en el cuerpo [16]. En este generalmente interviene un factor importante a considerar, el cual el consumo en base a la potencia requerida por el microondas, es decir, mientras más potencia presente el microondas, el tiempo de secado disminuye considerablemente. Generalmente estas suelen estar entre los rangos de 480, 640 y 800W respectivamente [15], [17].

Una de las ventajas del secado por microondas es la conservación de la vitamina C, además de la mantención del color de las frutas y verduras tratadas por este proceso de conservación [16].

Con respecto a las desventajas, se puede nombrar a la principal, siendo la desnaturalización de las proteínas presentes en los alimentos deshidratados, al sufrir modificaciones en su estructura, haciendo que de alguna forma estos pierdan parte de su valor nutricional inicial [16].

1.4.8. Equipamientos para el proceso de deshidratación.

Para la deshidratación de alimentos se requieren de ciertos espacios y artefactos que permiten una mejor distribución de estos en el espacio o volumen de control al cual estos se exponen. Estas se definen de acuerdo con los tipos de secado mencionados con anterioridad. Entonces se tiene:

Secado al ambiente

Canchas de secado: se construyen en lugares abiertos que permitan el ingreso de los rayos solares de forma constante. Generalmente de materiales como concreto o piedra. Estas deben estar fuera del alcance de focos de infección para evitar la contaminación del producto, son de grandes capacidades ya que dependen únicamente de la disponibilidad de espacio del lugar en el cual se distribuye el producto[1].

Bandejas de secado: consiste en una estructura ascendente con cierta inclinación hacia el norte, para facilitar la exposición al sol, de tal forma que se impida la proyección de la sombra sobre sí misma. Su ventaja radica en su fácil construcción y manejo. La capacidad de estas bandejas es variable, al ser de elaboración a conveniencia del productor. Aunque generalmente suelen estar en el rango de $1m^2$ lo que implica una proporción de aproximadamente 5-6kg de alimentos a deshidratar [1], [17].



Fig. 7:Disposición de las bandejas de secado en el ambiente [1].

Como desventajas se puede considerar el limitante de las horas de luz solar y velocidad del viento al día, la dificultad al momento de tener que guardarlas debido a la noche, el hecho de que ciertas partes del producto final pueden no resultar de buena calidad al presentarse putrefacción en casos en los que existan grandes porcentajes de humedad, y la presencia de agentes contaminantes como insectos, pájaros y la fauna circundante que presente en el lugar. El tiempo de secado, en base a las condiciones climáticas mediante este proceso es de aproximadamente 2 a 6 días [1], [18].

Secado mediante calor artificial

Secado mediante cocinas o calefactores: Consiste en la exposición controlada hacia un medio de generación de calor de los alimentos que se van a deshidratar. Generalmente se ubican en la parte superior desde donde se origina dicho calor. Algunos ejemplos de este tipo de deshidratación los podemos encontrar en zonas rurales, en donde se colocan los productos en la parte superior de un calefactor o cocina con el fin de secarlos [1]. Las ventajas de este proceso radican en la facilidad de instalación y uso.



Fig. 8: Bandejas y collares de secado instalados estratégicamente para aprovechar el aire caliente de un medio circundante [1].

Con respecto a las desventajas, se debe considerar la exposición de los alimentos al ambiente con humos y vapores impuestos al momento de uso de la cocina, además de la baja eficiencia y capacidad que esta puede presentar al estar ligada a una exposición ambiental con condiciones de calor y temperatura inestables [1].

Secado en bandejas: Se define como un conjunto de charolas de entre 10-100mm de profundidad dispuestas en un conjunto herméticamente aislado, en el cual se pueden depositar los productos a ser deshidratados, sean estos en rodajas, pastas o terrones. Generalmente están fabricadas en aceros inoxidables o cualquier otro material que resista las condiciones presentes en el entorno y sea adecuada para su uso con alimentos [3].

En este proceso se pueden usar diferentes fuentes de energía para generar el calor necesario para el deshidratado, desde el uso de leña, mediante combustibles líquidos o con gas, y por medio de resistencias eléctricas; siempre y cuando se asegure que los residuos que provienen de los mismos no interactúen con el volumen de control en el cual se va a trabajar. En la figura 1 se puede evidenciar el esquema de un secador de bandejas y sus distintas partes [1], [3].

Como ventajas se puede mencionar el hecho de un mejor control y cambio con respecto a las condiciones de secado, como lo son de temperaturas y velocidades del aire circundante, garantizando un proceso constante y por ende una mejor calidad del producto final. Además de la opción de tener una recirculación del aire, lo que permite mejorar la eficiencia y disminuir el tiempo de deshidratado de los alimentos [3].

1.4.9. Propiedades del tomate de riñón

Perteneciente a la familia de las solanáceas, (Slanum lycopersicum L), el tomate de riñón es una fruta originaria de los Andes de América del Sur, que actualmente se cultiva en la mayoría de los países de la región andina, lo que incrementa su variabilidad genética y por consiguiente sus presentaciones en cuanto a color y tamaño. Este alimento se puede encontrar principalmente en Ecuador, Chile, Colombia y Perú [19].

Propiedades físicas y químicas

Para el caso de estudio, el tomate de riñón y sus propiedades son de vital importancia al momento de interactuar con esta fruta en un medio de exposición con temperaturas variantes, ya que permiten definir las condiciones iniciales a las cuales se encuentra el producto para su posterior deshidratación. Generalmente esta tiende a variar en pequeños porcentajes debido a las condiciones de cultivo, grado de madurez, época de cosecha, almacenamiento, entre otros factores [20]. Razón por la cual, se ha estimado un promedio porcentual que se puede ver en la tabla 2. Mientras que en la tabla 3 se evidencia la composición química y nutricional más detallada del tomate en su etapa de madurez en base a una porción de 100g del mismo.

Tabla 1: Composición química promedio del tomate de riñón [20], [21].

Constituyentes	Composición química promedio
Agua	94%
Hidratos de carbono	4%
Grasas	0%
Proteínas	1%
Cenizas	0.3%
Otros (ácidos, vitaminas, entre otros)	0.7%

Tabla 2: composición química y nutricional del tomate en base a una porción especificada [21], [22].

Constituyentes	**Contenido por cada 100g**
Energía (kJ)	56.00
	Constituyentes básicos (g)
Agua	94.70
Proteína	1.00
Grasa	0.10
Fibra dietética	1.60
	Carbohidratos (g)
Glucosa	0.90
Fructosa	1.00
Sacarosa	0.00
Almidón	0.00
	Ácidos orgánicos (g)
Cítrico	0.43
Málico	0.08
Oxálico	0.00
Otros	0.00
	Vitaminas (mg)
Vitamina C	18.00
Tiamina	0.04
Riboflavina	0.02
Ácido nicotínico	0.70
β-caroteno (equivalente)	0.34
	Minerales (mg)
Potasio	2.00
Sodio	6.00
Calcio	8.00
Magnesio	10.00
Hierro	0.30
Zinc	0.20

Morfología

El tomate ya como fruto maduro se presenta como una baya que puede ser de forma redonda, achatada y globosa [19], que varía aproximadamente de 3 a 16cm de diámetro, teniendo un promedio mínimo de 5 a 5.5cm de diámetro para uso comercial, con una

superficie lisa o surcada de coloración roja, tomate o un tanto amarilla debido a la presencia de licopina y carotina [22], [23].

Peso

El peso del tomate es un indicador del desarrollo del fruto bajo distintas condiciones ambientales y de nutrientes impuestas por el agricultor en el proceso de crecimiento de la planta; este depende del estado de madurez y de la clasificación que se le asigna según su tamaño, como se puede evidenciar en la tabla 4 [20].

Tabla 3: criterio de clasificación en base al peso del tomate de riñón [20].

Criterio para la clasificación	**Promedio de peso +/- 1g.**
Grande	124-156 g
Mediano	75-123 g
pequeño	72-74 g

Densidad

La densidad del tomate de riñón puede variar dependiendo de distintos factores como la variedad, el grado de madurez y el contenido de agua presente en el mismo. Pero al saber que el porcentaje de agua presente en la fruta es de alrededor del 95%, a eso sumándole los valores correspondientes a solidos no azucarados, azucares, proteínas y grasas de la tabla 1 y 2, dan como resultado un intervalo de 0.97 a 1.02g/ml en cuanto a densidad, razón por la cual se trabajará con el promedio entre estos para fines de cálculo, es decir:

$$\rho_T = \frac{(0.97 + 1.02)\frac{g}{ml}}{2}$$

$$\rho_T = 0.995\frac{g}{ml} = 995\frac{kg}{m^3}$$

Sólidos solubles

Corresponden al porcentaje de azúcares en una solución. Estos se miden °Brix, y se encargan de determinar el índice de madurez de los productos de origen vegetal en conjunto con la acidez o porcentaje de ácido cítrico. Este proceso generalmente se presenta con mayor relevancia durante la maduración de los frutos [20], [22].

Con respecto a un tomate maduro, este presenta un promedio de solidos solubles de entre 3.8 a 7 °Brix en su etapa comercial según los distintos tipos de variedades existentes en el mercado [22], [23].

pH en estado maduro del tomate

EL pH se define como el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o solución compuesta. Su rango se encuentra entre el orden de 0 a 14, donde valores mayores a 7 corresponden a alcalinidad, 7 especifica un pH neutro, mientras que valores menores indican una mayor acidez [22] . Para caso del tomate de riñón maduro, es decir cuando este se encuentra en estado rojo maduro y presenta un aroma y sabor adecuado, se puede tomar un valor promedio del pH entre el rango de 4.04 - 4.1±0.1. Todo esto debido a las diferentes características que presentan las diferentes variedades y a las condiciones postcosecha a las cuales el alimento este sometido [20], [22].

Acidez

Corresponde a la cantidad de ácidos orgánicos presentes en la fruta u hortaliza estudiada. Para el caso del tomate se tiene al ácido cítrico con la mayor cantidad de porcentaje respecto al total, el cual se encuentra entre un promedio de 0.2 a 0.6% [22].

CAPÍTULO 2

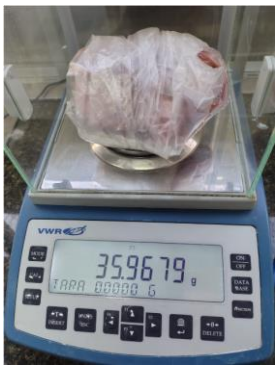
METODOLOGÍA

2.1.Materiales

Los materiales que se emplearán para el desarrollo del proyecto corresponden a todos aquellos que tengan que ver de manera directa e indirecta con el proceso de deshidratación. A continuación, se presenta la Tabla 6, que explica de forma detallada cada uno de ellos.

Tabla 4: descripción de los materiales usados para el diseño termodinámico.

Número	Nombre	Cantidad	Descripción	Foto
1	Deshidratador	1	Deshidratador digital 160L que funciona en base a aire caliente forzado, el cual circula por medio de ventiladores y se calienta con una niquelina	
2	Anemómetro	1	Instrumento de medición que se usa para medir la velocidad del viento	

3	Balanza	1	La balanza de laboratorio es un instrumento de medición de alta precisión utilizado para determinar la masa de sustancias, reactivos, muestras sólidas o líquidas con exactitud.	
4	Tomate de Riñón cortado en rodajas	336	Fruto grande y ovalado caracterizado por su pulpa carnosa y excelente sabor.	

2.2.MÉTODOS

2.2.1. Metodología

El presente trabajo de investigación se realizará mediante la recopilación de información que abarque todo aquello que tenga que ver con procesos de deshidratación, en base a artículos científicos, libros, tesis o páginas web de confianza que permitan la obtención de datos correspondientes a alimentos específicos sobre los cuales se va a realizar dicho diseño. Se reconocerán ciertas variables como los procesos básicos de secado, los equipos de deshidratación existentes en la actualidad y sus capacidades, las temperaturas y criterios de selección [1], entre otros términos que se estudiarán posteriormente.

Uso del deshidratador de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología

Como estudiante de titulación de la carrera de Ingeniería Mecánica, se requirió llevar a cabo el proceso de deshidratación de tomate de riñón como parte del desarrollo del proyecto de titulación. Sin embargo, el equipo deshidratador perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ya no se encontraba disponible durante el período establecido para la ejecución de las pruebas, debido a actividades académicas y uso previo del mismo en actividades referentes a vinculación, lo cual imposibilitó cumplir con la planificación inicial del objetivo número 3 y el cronograma.

Ante esta situación, y con la finalidad de garantizar la continuidad y cumplimiento de las actividades de investigación, se solicitó mediante **Memorando Nro. UTA-FCIAB-2025-2462-M** el uso del equipo deshidratador perteneciente al Laboratorio de Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato, considerando que dicho equipo cuenta con características técnicas acordes al proceso de deshidratación requerido. El empleo de este equipo permitió desarrollar las pruebas de deshidratado del tomate de riñón bajo condiciones controladas de temperatura, masa, tiempo y circulación de aire, asegurando la obtención de resultados confiables conforme con los objetivos planteados en el proyecto de titulación.

Con respecto a la fundamentación teórica, referente al proceso de cálculo y la consideración de variables, se especifica el uso de bibliografías referentes a termodinámica y transferencia de calor de distintos autores [11], [24]. Además de varios artículos científicos que contengan estudios similares al caso de análisis [1]. Entre estos se tendrá que destacar ciertos aspectos como el proceso de cálculo para la transferencia de calor por conducción y convención, el material, o en este caso, el tipo de fruto u hortaliza y sus valores en cuanto a conductividad, emisividad, porcentaje de humedad, calor y energía interna [10], además de otros factores como el tamaño y la disposición a la cual se va a someter al proceso de deshidratación.

Para el caso de estudio de los procesos existentes de deshidratación, se tomarán en cuenta aquellos que presenten un principio innovador en cuanto a tiempo de secado y calidad del producto final, como lo son el deshidratado por energía solar térmica [5], por secado convectivo mediante un flujo de aire caliente a una velocidad y temperatura definidas [18], el secado al vacío a través de la disminución del punto de presión y ebullición [18], la deshidratación por ósmosis, en la cual se pierde agua y humedad por medio de una lixiviación y un flujo de solutos [18], la liofilización, la cual consiste en la deshidratación por sublimación de los productos alimenticios congelados [18], [25], entre otros. Además de ciertos aspectos como los recursos necesarios, el método de calentamiento, la predisposición en cuanto al volumen de control necesario y los materiales adecuados que se deben emplear para aprovechar al máximo la transferencia de calor entre el ambiente y los alimentos que se vayan a usar.

Con respecto a las variables y gráficos a obtener, se especifica el uso del equipo acorde a las condiciones de frontera identificadas en los respectivos procesos de cálculo, tales como dimensiones de la máquina, temperatura, presión, velocidad de flujo de aire, cantidad de masa de tomate a deshidratar. Todo esto con el fin de recopilar la mayor cantidad de datos posibles y tener una base sólida que valide la información referente al proceso de deshidratado.

Por último hay que aclarar que esta investigación está centrada únicamente en el diseño simulado del proceso de deshidratación de frutas y hortalizas, con el fin de obtener datos relevantes que sirvan de guía en cuanto a la obtención de las mismas, razón por la cual se esclarece que siempre existirá cierto grado de incertidumbre con respecto a la realidad, ya sea por diversos factores como la calidad del aire, las dimensiones y el volumen del conjunto en el cual se realiza el análisis, las pérdidas de calor, entre otros.

2.2.2. Diagrama de Flujo del proyecto

Según Manene, un diagrama de flujo o flujograma se define como la representación gráfica, simbólica o pictórica de la secuencia de actividades o rutinas que se van a realizar a lo largo del desarrollo de un proyecto [26].

El diagrama de flujo correspondiente al diseño termodinámico del proceso de deshidratación de frutas y hortalizas comprende la obtención de datos relevantes que permitan una optimización en cuanto a la calidad del producto deshidratado, enfatizándose en el caso particular de tomate de riñón. Para llegar a dichos propósitos se tomó en cuenta el siguiente listado de actividades mostrado en la fig. 9.

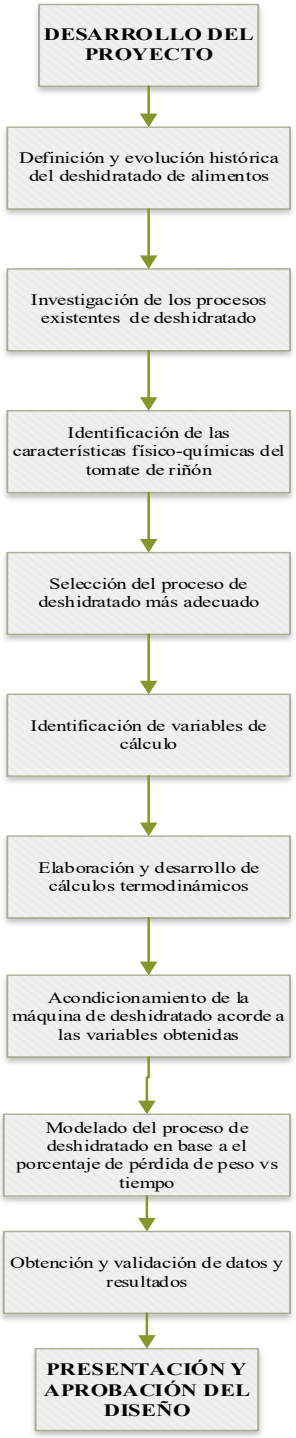


Fig. 9: Flujograma del proyecto en base a las actividades planteadas.

2.2.3. Criterios de evaluación para selección de alternativas

Los criterios para la selección de la alternativa más adecuada se centrarán en todos los parámetros que intervienen en cuanto a eficiencia, costos energéticos y de operación del tipo de deshidratador, además del respectivo análisis en cuanto a valores nutricionales del producto final. Razón por la cual se presenta un cuadro de ponderación que determine la mejor opción para el posterior diseño.

Tabla 5: ponderación para la selección de la alternativa de deshidratado más adecuada para el tomate de riñón.

Selección de la alternativa de deshidratación				
Puntuación cualitativa:	1=Muy deficiente	2=Deficiente	3=Aceptable	4=Alta	5=Muy alta
			TIPO DE DESHIDRATADOR	
Criterios de selección			**Solar**	**Mediante aire caliente forzado**	**De microondas**
Eficiencia del sistema, es decir, cantidad de tiempo en el que se tarda en deshidratar un alimento.			2	4	4
Costos referentes al consumo energético			5	3	2
Facilidad para el control de temperatura			1	5	4
Facilidad de construcción e instalación			3	3	3
PUNTAJE TOTAL			11	15	13

Los valores proporcionados a cada uno de los procedimientos de deshidratación evaluados son producto de un análisis cualitativo en cuanto a facilidad de uso y obtención de materiales, además de los respectivos costos de operación de la máquina.

Como mejor resultado se tiene al uso del deshidratador con aire caliente forzado, ya sea por calentamiento mediante resistencia eléctrica o por gas, razón por la cual se tomará este principio de funcionamiento para la obtención de datos posteriores que involucren el diseño termodinámico planteado.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

3.1.1. Parámetros y variables para el diseño termodinámico

Propiedades físicas del sector

El proceso de deshidratación de alimentos, y del tomate en particular, requiere de diversas variables correspondientes al sector en el cual se va a utilizar el deshidratador de aire caliente forzado. La ciudad de Ambato, la cual se encuentra ubicada a una altitud de 2580 msnm, presenta una presión atmosférica que se puede identificar de acuerdo con las propiedades de la atmosfera a gran altitud mencionadas en Apéndice 1 del libro de transferencia de calor y masa de Cengel, la cual es interpolada y denotada en la tabla 5. En la tabla 6 se identifican características en cuanto a temperatura promedio anual, esto según el plan de desarrollo y ordenamiento territorial impuesto por el GAD municipal de la ciudad [27].Los datos correspondientes a temperatura de punto de Rocío y humedad relativa promedio se identifican en base a la página de la red meteorológica del gobierno provincial de Tungurahua, sector de la Unidad educativa Pedro Fermín Cevallos, con un intervalo de tiempo de aproximadamente un año [28].

Tabla 6 : propiedades atmosféricas de acuerdo con diversas altitudes [10].

Propiedades de la atmosfera a gran altitud	
Altitud (m)	Presión (kPa)
2400	75.63
2600	73.76

Al interpolar el valor de la altitud de la ciudad, el cual es de 2580msnm, tenemos una presión atmosférica de 73.95kPa.

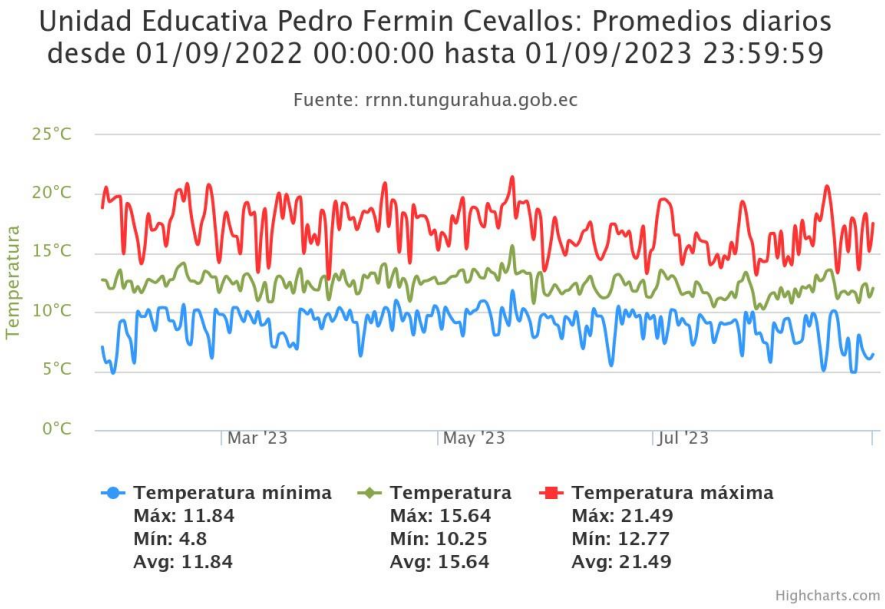


Fig. 10: Rango de temperaturas promedio diarios para la ciudad de Ambato [28].

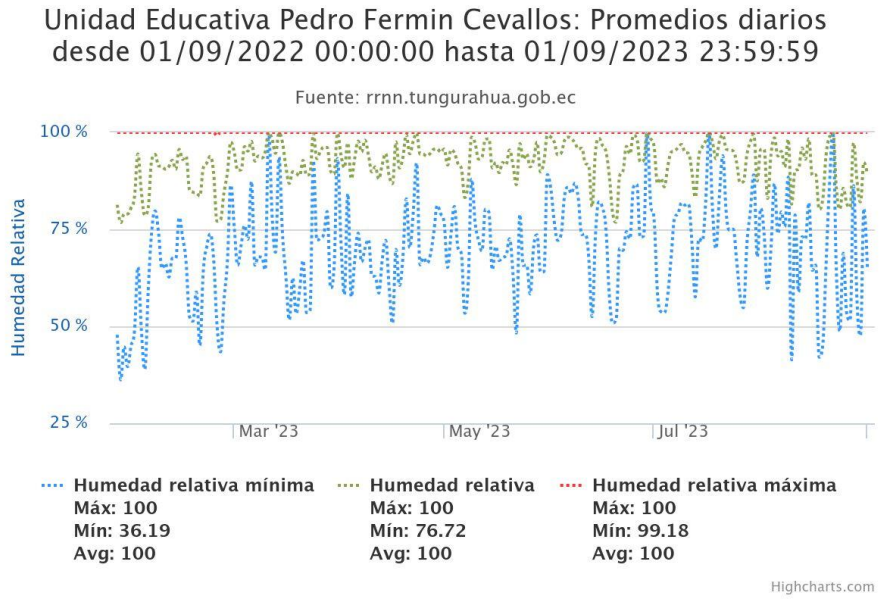


Fig. 11: Humedad relativa promedio para la ciudad de Ambato [28].

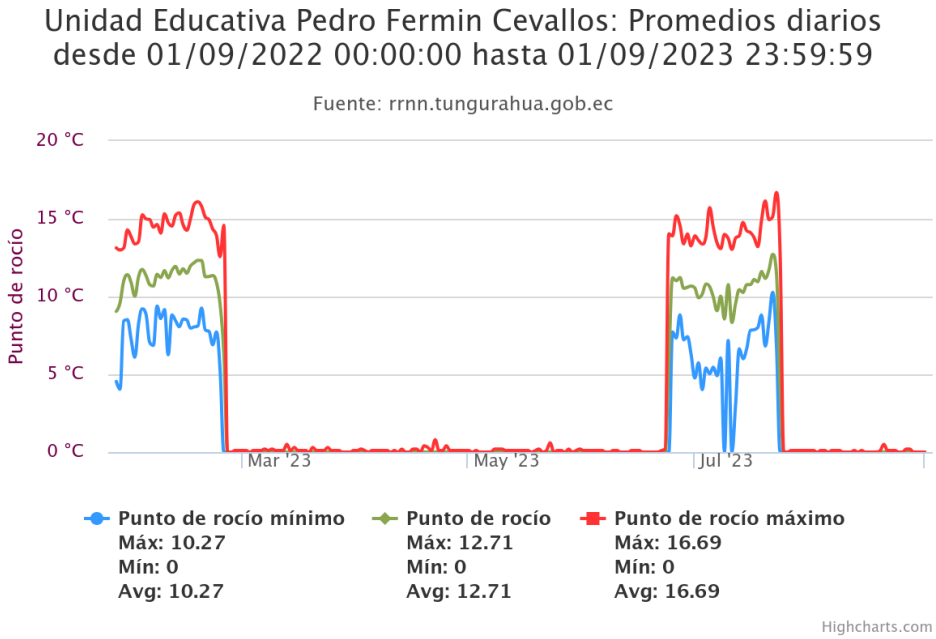


Fig. 12: Temperatura de punto de rocío para la ciudad de Ambato [28].

Tabla 7 : características psicrométricas de la ciudad de Ambato [28].

Parámetro	**Valor promedio**
Presión atm	73.95kPa
Temperatura promedio	15.64°C
Humedad relativa	73%
Temperatura de punto de Rocío	12.71°C

3.1.2. Propiedades del entorno deshidratador

El deshidratador que se usa para la investigación es de resistencia eléctrica con aire caliente forzado, el cual es generado por ventiladores. Su fabricación está a cargo de la empresa Cabelas, es decir, es resultado del diseño y distribución por parte de la entidad encargada de la elaboración de este producto. Está diseñado con acero inoxidable y consta de un aislamiento térmico entre paredes. Sus dimensiones, en la cámara interna son de 70cm de largo por 53cm de ancho y 42cm de espesor. El control de temperatura es regulable en base al intervalo de temperaturas adecuadas que se requieran para la deshidratación.



Fig. 13: Deshidratador usado para el análisis y toma de datos.

3.1.3. Grosor de corte adecuado para la deshidratación

El grosor en base al artículo científico de Elaboración de Tomate Deshidratado [29], establece que las rebanadas de tomate deben ser de no más de 10mm; Para el caso, la herramienta usada para elaborar las rodajas exhibe un corte de 6.5mm de espesor, con el fin de permitir una transferencia de calor adecuada en el medio. Dicho corte se debe realizar de forma axial con el objetivo de retirar la mayor cantidad de semillas del fruto.

3.1.4. Cálculo de la capacidad máxima de tomate de riñón deshidratado

El deshidratador que se usa como medio para las condiciones de cálculo consta de bandejas de malla para la respectiva disposición del producto. Las dimensiones de las bandejas se muestran en la figura 14.

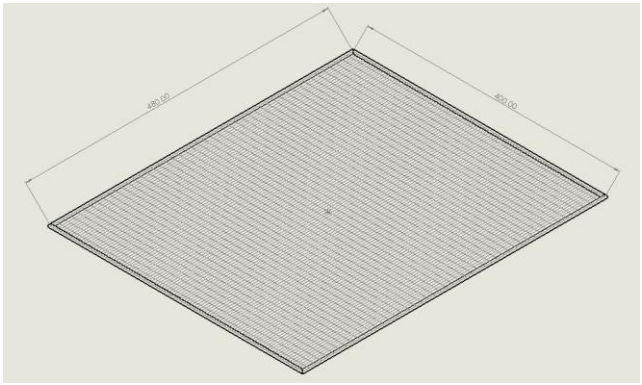


Fig. 14: Dimensiones de las bandejas existentes en el deshidratador.

Ahora, en base al tamaño promedio de un tomate de riñón, considerando rodajas de 6.5mm de espesor y un diámetro de 5.5cm, la distribución en cuanto a capacidad del área total sería:

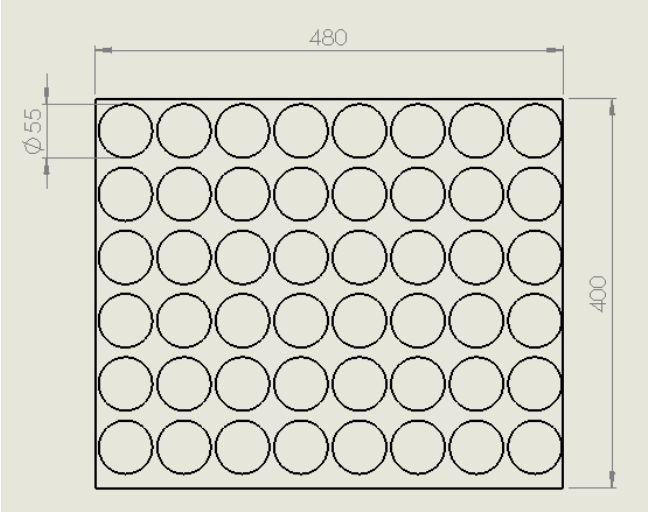


Fig. 15: Distribución de las rodajas de tomate en la bandeja del deshidratador.

Entonces, calculando el área ocupada por las rodajas de tomate:

$$A_{Rodajas\ tomate} = \left(\frac{\pi(55mm)^2}{4}\right)(48) = 114039.81mm^2 = 0.1140m^2$$

Para el cálculo del volumen de tomate, se debe tomar en cuenta el espesor de las rodajas y el número de bandejas disponibles en el deshidratador, para el caso, se usarán 4. Entonces:

$$V = 7\left(A_{Rodajas\ tomate}\right)\ (espesor\ de\ rodaja) \tag{7}$$

$$V = 7(0.1140m^2)(0.0065\text{m})$$
$$V = 0.005187m^3$$

Con el volumen disponible en función de la capacidad de las bandejas y la densidad del tomate según la ecuación. 8, determinamos la cantidad de masa que puede ingresar en el deshidratador.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{8}$$
$$m = \rho\, V$$
$$m = \left(995\frac{kg}{m^3}\right)(0.005187m^3)$$
$$m = 5.161kg\ \ de\ tomate$$

3.1.5. Temperatura de deshidratación

Corresponde a la temperatura del aire circundante en el medio en el cual se depositan los alimentos a ser deshidratados. Según E. Ochoa y V. Guzmán en sus trabajos de investigación referentes a la deshidratación para la preservación del tomate [15], [30], la temperatura más adecuada para conservar de mejor forma las propiedades visuales y sensoriales del tomate, además de gran porcentaje de sus respectivos nutrientes corresponde al rango de entre 60 a 70°C respectivamente. Razón por la cual se estimará una temperatura promedio del aire circundante de 65°C para procesos de cálculo y obtención de datos.

Con los datos de la temperatura de deshidratación y la temperatura promedio del sector, se puede determinar la variación existente entre el interior de la cámara de deshidratado y el medio exterior.

$$\Delta T = T_1 - T_\infty \tag{7}$$

Donde:

T_1: corresponde a la temperatura en el interior de la cámara de secado

T_∞: Temperatura promedio del medio circundante

Entonces, reemplazando los datos se tendría:

$$T_1 = 65°C = 338K$$
$$T_\infty = 15.64°C = 288.64K$$
$$\Delta T = (338 - 288.64)K$$
$$\Delta T = 49.36K$$

3.1.6. Velocidad del aire

La velocidad del aire seco es importante al momento de realizar el cálculo del calor transferido desde el aire hacia el alimento depositado en la cámara de deshidratado. Esta debe encontrarse entre los valores de mínimo 0.2 a 2 m/s, preferentemente 1.5 m/s según diversos autores como Ochoa [15] u Ortiz [29].

La máquina deshidratadora del laboratorio presenta una velocidad constante, de la cual se realiza mediciones a la entrada con el fin de corroborar el valor en m/s. El proceso se realizó a partir de un sondeo de mediciones realizadas mediante un anemómetro ubicado en el sentido de flujo del aire, con el fin de hallar la velocidad promedio de este, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 8 : datos correspondientes a una muestra de diez valores para la obtención de un valor de velocidad promedio del aire.

N° de medición	**Velocidad del aire (m/s)**
1	0.4
2	0.4
3	0.6
4	0.4
5	0.4
6	0.4
7	0.6
8	0.4
9	0.6
10	0.4
Promedio	0.46



Fig. 16: Anemómetro ubicado a una distancia media del volumen de control y perpendicular al eje de los ventiladores.

Los datos obtenidos indican una velocidad promedio del aire seco de $0.46 \cong 0.5 m/s$, razón por la cual se tomará esta como dato para el cálculo posterior de todas las variables que se requieran para el proceso de deshidratación.

3.1.7. Identificación del tiempo de secado mediante datos proporcionados por análisis de laboratorio

La determinación del tiempo de secado comprende un conjunto de variables termodinámicas que se desarrollan en base a los datos y condiciones atmosféricas anteriormente señaladas en este capítulo. Dichas variables son:

Cálculo del calor específico para el tomate

Debido a la ausencia de información que permita identificar un calor especifico del tomate de riñón, este se procederá a determinar de acuerdo con la expresión planteada en el Anexo 6 tomada del libro de Transferencia de calor y masa de Yunes Cengel, en el cual se especifica que se puede obtener el mismo a partir del contenido de agua (en porcentaje), siempre y cuando el alimento se encuentre en un rango de temperaturas de entre 3 a 32°C [10]. La fórmula que permite su respectivo cálculo es:

$$Cp = 1.68 + 2.51\ (contenido\ de\ agua) \quad en\ (\frac{kJ}{kgK}) \tag{8}$$

Como se sabe que el contenido de agua del tomate es del 94% según la tabla 1, reemplazamos en la ecuación:

$$Cp = 1.68 + 2.51\ (0.94)$$

$$Cp = 4.0394\,\frac{kJ}{kgK}$$

El deshidratado del tomate de riñón ha sido un caso que se ha venido estudiando con anterioridad en el cantón, específicamente en la Universidad Técnica de Ambato, razón por la cual este apartado tiene como principio fundamental el reconocer los datos ya existentes en cuanto a ensayos anteriores de deshidratación de este alimento proporcionados por el laboratorio de control y análisis de alimentos de la institución [31],

[32], con el único fin de evaluar el proceso para su posterior mejora y rediseño, desarrollando significativamente el mismo acorde a las necesidades de la población.

Cálculo de la pérdida de humedad

La pérdida de humedad del fruto representa la cantidad de agua evaporada durante el proceso de deshidratación [12]. Este dato es de vital importancia ya que permite relacionar este valor con el diseño termodinámico para diferentes cantidades de tomate a deshidratar. Dicha pérdida se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{100 - H_i}{100 - H_s} \tag{9}$$

Donde:

R: representa el rendimiento o factor de masa de agua deshidratado.

H_i: Humedad inicial del fruto antes de la deshidratación.

H_s: Humedad después del proceso.

Teniendo en cuenta estos datos, y en base a los informes de laboratorio anteriormente mencionados, se tienen los siguiente:

$$H_i = 95.8\%$$
$$H_s = 5.54\%$$

En base a los porcentajes de humedad identificados, reemplazamos en la ecuación:

$$R = \frac{100 - 95.8}{100 - 5.54}$$
$$R = 0.0445$$

Con el dato del factor de masa definido, el siguiente paso es hallar la cantidad de masa después del deshidratado, la cual se puede definir mediante la ecuación. Siendo $m = P_e = 9.68kg$ de tomate maduro

$$P_s = R\ P_e \tag{10}$$

Donde:

P_e: Peso entrada del alimento

P_s: Peso de salida del alimento, después del proceso de secado.

Entonces, reemplazando los datos del peso de entrada se tiene:

$$P_s = (0.0445)\ (5.161kg)$$
$$P_s = 0.2296kg \quad de\ tomate\ deshidratado$$

Con la diferencia de pesos, es fácil determinar la cantidad de masa de agua que se ha evaporado del fruto al restar el peso inicial del peso final, de tal forma que se tiene:

$$m_{H_2O} = P_e - P_s \tag{11}$$
$$m_{H_2O} = (5.161 - 0.229)kg$$
$$m_{H_2O} = 4.931kg$$

3.1.8. Transferencia energética hacia el tomate de riñón

La transferencia de calor hacia el tomate durante los primeros minutos de deshidratación comprende a un proceso de incremento de la temperatura en el sólido correspondiente a la rodaja de tomate cortada desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de deshidratado. Durante este tiempo, se tiene la presencia del principio de calor sensible en base a la variación de dicha temperatura.

Para el cálculo, usando la ec. 1:

$$Q = mCp\Delta T$$

Considerando las condiciones, de variación de temperatura y calor específico planteadas con anterioridad, además de la masa del tomate maduro para la ecuación, al tratarse del inicio del proceso de deshidratado, se tiene:

$$Q = (5.161kg)\left(4.0394\frac{kJ}{kgK}\right)(49.36K)$$

$$Q = 1029.02kJ$$

3.1.9. Transferencia energética en el proceso de deshidratado del tomate a temperatura constante

La pérdida de humedad en el tomate en términos de masa permite tener una idea clara de la cantidad de agua removida y calor transferido en el proceso de deshidratación cuando se ha llegado a la temperatura de deshidratación constante. Con el dato de la presión atmosférica del sector se puede determinar la entalpía de evaporación presente, con el fin de posteriormente determinar el tiempo de duración del secado. En los anexos de la Termodinámica de Yunes Cengel, se puede hallar el dato mencionado en función de la presión atmosférica de 73.95kPa previamente definida en la tabla 5.

Tabla 9: propiedades del agua saturada a diferentes presiones [24].

916
TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

		Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Líq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líq. sat, h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

El valor de la entalpía de evaporación se determina interpolando entre los rangos de presión de 50 a 75kPa. Dando como resultado:

$$h_{fg} = 2279.12 \frac{kJ}{kg}$$

Para identificar la transferencia energética hacia el tomate de riñón, ocupamos la definición del calor latente de la ecuación. 2, al saber que el proceso ha llegado a una temperatura constante de 65°C, en la cual se produce un cambio de estado de líquido a vapor, razón por la cual se procedió a la obtención de la entalpía de vaporización h_{fg}.

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O}(h_{fg})$$

$$Q_{H_2O} = (4.93kg)\left(2279.12\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$Q_{H_2O} = 11236.06kJ$$

3.1.10. Cálculo de la Potencia en función de la cantidad de tomate maduro

En los apartados anteriores se puso en evidencia el calor requerido para elevar la temperatura del tomate de riñón hasta una temperatura constante de 65°C. En esta sección, se parte de la potencia consumida del producto con el único fin de tratar de optimizar el proceso en cuanto a reducción de tiempo y dinero invertido.

Entonces, calculando la potencia a partir del calor sensible mediante la ecuación. 14**,** y considerando el tiempo de inducción o ajuste, es decir, aquel en el cual el sólido se calienta hasta penetrar el centro de este, mientras la velocidad de evaporación se incrementa y la masa del alimento disminuye [3]. Inicialmente, el proceso de transferencia de calor requiere calentar la fruta hasta la temperatura de deshidratado de 65°C, el cual según Ortiz [29], ronda aproximadamente los ±40 min. Entonces, tomando dicho tiempo:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \tag{12}$$

Donde:

$\dot{Q}$: Potencia requerida para llegar a la temperatura de equilibrio.

t: tiempo en el cual el fruto llega a la temperatura de equilibrio.

$$\dot{Q} = \frac{1029.02kJ}{(40\text{min})\left(\frac{60s}{1min}\right)}$$

$$\dot{Q} = 0.42875kW = 428.75W$$

Con la potencia necesaria, calculamos el tiempo de deshidratado a temperatura constante a través del calor latente obtenido anteriormente y la siguiente **ecuación**

$$t_d = \frac{Q_{H_2O}}{\dot{Q}} \tag{13}$$

Donde:

t_d: tiempo de Deshidratado a temperatura constante.

$$t_d = \frac{11236.06kJ}{0.429kW}$$
$$t_d = 26191.28s$$
$$t_d = 7.28h$$

A este tiempo se le deben añadir los 40 min de calentamiento de las rodajas de tomate hasta llegar a la temperatura de equilibrio, dando como resultado:

$$t_T = 7.28h + 0.67h$$
$$t_T = 7.95h$$

3.1.11. Cálculo del caudal de aire requerido para el sistema

Según [12], el caudal de aire se puede identificar mediante el flujo de calor generado y el flujo de aire circundante, siempre y cuando las condiciones del sistema sean constantes, entonces a partir de esta definición, se puede determinar el caudal mediante la potencia requerida del sistema:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \, Cp_a \, \Delta T \tag{14}$$

Donde:

$\dot{Q}$: Potencia requerida del sistema para el calentamiento del fruto en kW, siendo igual a Q/t.

$\dot{m}_a$: Flujo másico del aire, expresado en kg/s.

Cp_a: Calor específico del aire a presión constante $1.005\,kJ/kgK$ [10].

ΔT: Variación de temperatura entre la entrada y salida del aire $49.36K$.

Despejando el flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{Cp_a\,\Delta T}$$

$$\dot{m} = \frac{0.428\,\frac{kJ}{s}}{1.005\,\frac{kJ}{kgK}\,(49.36K)}$$

$$\dot{m} = 8.6278(10^{-3})\,\frac{kg}{s}$$

Una vez obtenido el flujo másico, determinamos el flujo volumétrico a partir de la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \tag{15}$$

Donde:

ρ_a: Densidad del aire a la altura de 2580 m.s.n.m. siendo según el **Anexo**. 4 igual a $0.949\,kg/m^3$

$\dot{V}$: Flujo volumétrico del aire en m^3/s

Despejando

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_a}$$

$$\dot{V} = \frac{8.6278\,(10^{-3})\,\frac{kg}{s}}{0.949\,kg/m^3}$$

$$\dot{V} = 9.0915\ (10^{-3})\frac{m^3}{s}$$

3.1.12. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección interviene en el proceso de secado al relacionarle con el flujo y a velocidad del aire circundante y su calentamiento con la resistencia. Dicho valor se debe elegir en función de la geometría de la cámara de secado. Y al ser este un sistema cerrado con aire en movimiento:

Equation	Limits	Condition	Remarks/Sources
$h_c = 8.3V^{0.6}$ $h_c = 3.1$	$0.2 < V < 4.0$ $0 < V < 0.2$	Seated with moving air	Mitchell (1974)
$h_c = 2.7 + 8.7V^{0.67}$ $h_c = 5.1$	$0.15 < V < 1.5$ $0 < V < 0.15$	Reclining with moving air	Colin and Houdas (1967)
$h_c = 8.6V^{0.53}$	$0.5 < V < 2.0$	Walking in still air	V is walking speed (Nishi and Gagge 1970)
$h_c = 5.7(M - 0.8)^{0.39}$	$1.1 < M < 3.0$	Active in still air	Gagge et al. (1976)
$h_c = 6.5V^{0.39}$	$0.5 < V < 2.0$	Walking on treadmill in still air	V is treadmill speed (Nishi and Gagge 1970)
$h_c = 14.8V^{0.69}$ $h_c = 4.0$	$0.15 < V < 1.5$ $0 < V < 0.15$	Standing person in moving air	Developed from data presented by Seppänen et al. (1972)

Note: h_c in W/(m^2·K), V in m/s, and M in met, where 1 met = 58.1 W/m^2.

Fig. 17: Ecuaciones de los coeficientes de transferencia de calor por convección en función de la velocidad del aire circundante y las condiciones de flujo de aire [12].

Según lo indicado por la figura 16, y la velocidad del aire medida de $v = 0.46m/s$, se tiene una ecuación de transferencia de calor:

$$h_c = 8.3V^{0.6} \tag{16}$$

Donde:

h_c: coeficiente de transferencia de calor por convección W/m^2K

V: Velocidad del aire circundante en m/s

Entonces considerando únicamente un análisis interno del proceso sin perdidas de calor entre las paredes:

$$h_{cint} = 8.3(0.46)^{0.6}$$
$$h_{cint} = 5.21\ W/m^2K$$

3.1.13. Tiempo de deshidratado bajo las condiciones impuestas por la máquina

Una vez determinados los parámetros y variables de diseño en base al procedimiento de cálculo, se puede evidenciar una demora significativa en cuanto a la duración del deshidratado de tomate, razón por la cual se procede a realizar un recalculo de acuerdo con la potencia suministrada por la niquelina de la máquina y la velocidad de aire impuesta por los ventiladores de esta, la cual se encuentra ya definida en secciones previas de este capítulo. Entonces con una $\dot{Q} = 1.6kW$ se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 10 : resultados del cálculo con un valor de potencia suministrada de 1.6. kW.

Descripción	**Valores de cálculo**	**Simbología**	**Valor**
Tiempo de deshidratado	$t_d = \frac{11236.06kJ}{1.6kW}$	t	$1.95h \approx 2h$
Tiempo de deshidratado total	$t_d = 1.95h + 0.67h$	t_T	$2.62h \approx 3h$
Caudal de aire requerido		$\dot{V}$	$5.203 * 10^{-3}\frac{m^3}{s}$

Cabe destacar que los valores expresados en la tabla indican únicamente resultados teóricos bajo condiciones ideales y sin pérdidas de calor, para lo cual, se establece que el tiempo adecuado para la deshidratación será de aproximadamente 8h en base al cálculo anteriormente mostrado.

3.1.14. Curvas de Secado

Con los parámetros definidos en cuanto a temperatura de deshidratado, propiedades del tomate de riñón, humedad del sector, velocidad del aire, potencia de la máquina entre otros, se establece ciertas variables a modificar en cuanto a procesos de cálculo con el único fin de mejorar el rendimiento del proceso en optimización del tiempo de deshidratado, resultados sensoriales, organolépticos y nutricionales, los cuales se pueden evidenciar en las curvas de pérdida de humedad con respecto al tiempo.

Para la elaboración de las curvas de deshidratado, se toma como punto de partida el uso del deshidratador del Laboratorio de la Facultad de alimentos antes mencionado, a la temperatura de 65°, con 8 muestras y un promedio de masa de 480.50g, (figura 17), en un lapso de 8 horas. El proceso consistió en incorporar la distribución de las rodajas de tomate de 5-6mm de espesor en las 8 bandejas del deshidratador, cada una de las cuales contenía 48 rodajas debidamente distribuidas.



Fig. 18: Peso de las tres primeras muestras de tomate a deshidratar, cada uno con 48 rodajas de tomate distribuido en la bandeja del deshidratador.



Fig. 19: Distribución de rodajas de tomate en las bandejas del deshidratador.

Dentro del deshidratador, cada bandeja se coloca con una distancia vertical entre las mismas, con el fin de garantizar un flujo de aire caliente equitativo. Las muestras se retiran en el lapso de cada hora, con el fin de identificar la pérdida de humedad con respecto al tiempo.



Fig. 20: Bandejas con las rodajas distribuidas en el deshidratador.

De acuerdo con el intervalo de horas anteriormente mencionado (8h), se identificaron los siguientes datos en base a la proporcionalidad de peso inicial y final de cada muestra. Se omitió el peso de la funda plástica que sirve como recipiente para incorporar la masa de

tomate en la balanza, el cual es de 2.36g (figura 20), con el fin de maximizar la precisión en los resultados obtenidos.



Fig. 21: Peso de la funda plástica medido en una balanza de precisión, que sirve como recipiente de medición.

El proceso de deshidratado de tomate, a partir de todos los parámetros anteriormente identificados, y puestos en marcha en la máquina, dando como resultado los siguientes datos:

Tabla 11: datos obtenidos del proceso de deshidratación del tomate en un periodo de 8 horas

N° horas (h)	**peso inicial (g)**	**peso final (g)**	**Humedad extraída (g)**	**Humedad extraída (%)**	**% masa de Humedad extraída concorde al peso inicial**
0	**492**	492			0.00%
1	492	219	273	44.51%	55.49%
2	464	136	328	29.31%	70.69%
3	475	58	417	12.21%	87.79%
4	483	37.12	445.88	7.69%	92.31%
5	478	39.11	438.89	8.18%	91.82%
6	474	36.24	437.76	7.65%	92.35%
7	491	32.67	458.33	6.65%	93.35%
8	487	35.97	451.03	7.39%	92.61%
Promedio	480.50				

De tal manera que a partir de los datos proporcionados por la tabla 11 se tiene la siguiente Curva:

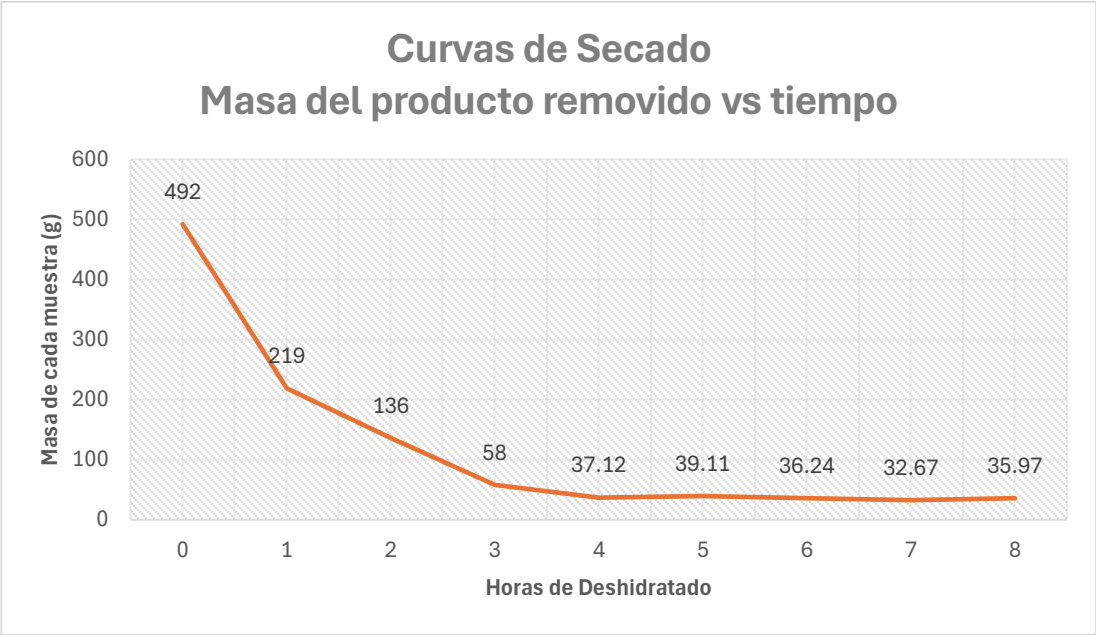


Fig. 22: Curva de secado del tomate de riñón, muestras de pesos similares y su reducción de humedad en función del tiempo.

En la figura se identifica una disminución de la masa en función del tiempo, en la etapa 1, (0-1h), se denota una perdida considerable de la humedad presente en la superficie y exteriores de las rodajas producto de la exposición del tomate de riñón a la temperatura de 65°C. En la etapa 2 (1-3h), el secado se considera como moderado, y se libera la humedad intracelular. Esta presenta mayor dificultad ya que las cortezas y paredes externas empiezan a secarse. Finalmente, en la etapa 3, existe una tendencia al equilibrio y el secado se torna lento, ya que la pérdida de agua se centra en las paredes celulares y humedad residual de ciertos sectores de la rodaja. Esta fase ocurre aproximadamente partir de la cuarta hora.

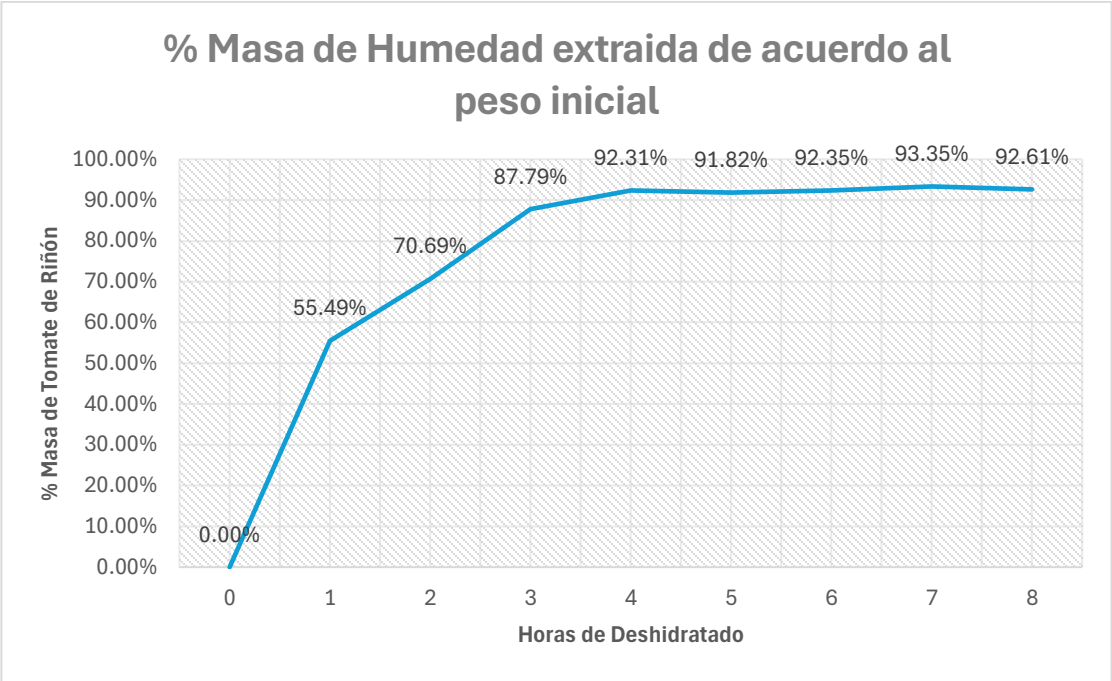


Fig. 23: Porcentaje de humedad removida del tomate de riñón a lo largo del proceso de deshidratado para cada muestra.

Con respecto al porcentaje de humedad extraída, se visualiza una pérdida del 55.49% en peso de agua en la primera hora, lo que refleja el periodo de secado rápido anteriormente mencionado. En la etapa 2, entre las horas 1-3, el deshidratado se modera a liberar cantidades menores de humedad. Para la etapa 3, a partir de la 3 hora, el secado se torna lento, y en la hora 4 la curva tiende a estabilizarse para finalmente tener una tendencia constante a partir de la hora 7.

Propiedades del tomate después del deshidratado

Las propiedades correspondientes a un ensayo de gravimetría del tomate de riñón [32], después del proceso de deshidratado, a una temperatura de 65°C, se presentan en la tabla 12:

Tabla 12: resultados identificados en base al certificado no. 25-006-a de análisis de laboratorio de una porción de 100g de tomate deshidratado.

Ensayos	Métodos utilizados	Unidades	Resultados
Cenizas, gravimetría	AOAC Ed. 22, 2023 923.03	%	11.8
Proteína, Kjedhal	AOAC Ed. 22, 2023 2001.11	%(Nx6.25)	10.2
Humedad, Gravimetría	AOAC Ed. 22, 2023 925.10	%	5.54
Grasa, Gravimetría	AOAC Ed. 22, 2023 2003.06	%	2.45
Fibra dietética total, Gravimetría	AOAC 993.21 Ed. 22, 2023	%	14.9
Carbohidratos totales, Cálculo	Cálculo	%	55.1
Energía, Cálculo	Cálculo	Kcal/100g	283
		K.J/100g	1185

3.1.15. Parámetros Finales del diseño

Corresponden a las variables optimizadas, las cuales se pueden controlar, para un proceso de deshidratación eficiente, en el que se obtienen los mejores beneficios nutricionales del tomate de riñón. Dichos valores se representan en la siguiente tabla:

Tabla 13: Parámetros finales de diseño para el proceso de deshidratación del tomate de riñón.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de secado	65	$°C$
Velocidad del Aire	0.5	m/s
Tiempo de deshidratado	3	h
Capacidad Máxima	5.161	kg
Potencia Requerida	0.428	kW
Caudal Requerido	$9.0915 * 10^{-3}$	m^3/s
Humedad final	5.54	%

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

- El diseño termodinámico del proceso de deshidratación de frutas y hortalizas comprende un conjunto de aspectos que conllevan a la optimización en cuanto a tiempo de secado, con enfoque particular en el tomate de riñón, que garantice un producto final que conserve de gran manera las propiedades nutricionales del mismo, además de que se incremente su periodo consumible.

- Los parámetros que tiene mayor relevancia en cuanto a la deshidratación de un alimento, tienen que ver con ciertos valores de porcentajes de humedad, calor específico, densidad y tamaño del fruto, además de factores correspondiente al entorno como la humedad relativa, temperatura del medio circundante en función de la potencia suministrada, flujo, coeficiente de convección y velocidad del aire que en conjunto con la capacidad del deshidratador forman un compendio de variables que se pueden controlar en función del tiempo, de entre los que se destacan la potencia y la velocidad del aire. Siempre y cuando se tenga un criterio definido de la calidad y porcentaje de humedad al cual se quiera llegar.

- Dentro de los cálculos realizados en la investigación, se define que, para el caso particular del tomate en función de las dimensiones del deshidratador analizado, Con un peso de 5.16kg de tomate maduro, se requiere generar una cantidad de potencia mínima de 428.75W con un tiempo de secado total de 7.95h. Mientras que, con la resistencia existente en el mismo, al ser de 1.6kW hace que este tiempo reduzca el 90% de la humedad en peso en aproximadamente 2-3h, lo que se puede considerar como una ventaja al momento de elaborar un producto alimenticio en masa. Cabe recordar, que estos resultados se presentan bajo suposiciones de ausencia de pérdidas de calor presentes en las paredes y hendijas del deshidratador.

- Los resultados presentes en las curvas de deshidratado reflejan una reducción drástica del porcentaje de agua presente en el tomate, en el que se llega a valores de 93.35%, es decir, cercanos al 94%, lo que se considera como un deshidratado

ideal para este fruto. En estas se identifican tres etapas fundamentales en el proceso de deshidratado, es decir, a velocidad constante, velocidad decreciente y equilibrio, siendo esta última un indicador de que a partir de ese tiempo se perderán cantidades de humedad mínimas, razón por la cual el secado se puede detener sin afectar en mayor porcentaje la humedad final del producto. A partir de la séptima hora, se evidencia la mayor cantidad de agua removida, razón por la cual este el punto se puede considerar como el principio de la continuidad, razón por la cual deshidratar más allá de este tiempo ya no tiene sentido porque ya no habrá más pérdidas de humedad.

RECOMENDACIONES

- Cuando se quiere realizar un proceso de deshidratación de un alimento en particular, se recomienda identificar los porcentajes de humedad de estudios anteriores para obtener el valor de la cantidad de agua removida, ya que, al ser un valor adimensional, se puede usar en función de la cantidad de masa que se va a deshidratar.

- Dentro de lo que corresponde a la deshidratación, se debería realizar una investigación más detallada de los procesos combinados de secado, como el de deshidratación con aire caliente forzado y por microondas, ya que hay claras evidencias de que las propiedades nutricionales de los alimentos se conservan de mejor manera.

- Con respecto a las variables que intervienen en el proceso de secado, se puede evidenciar que, si se requieren de mejoras en cuanto a tiempos de deshidratado en los productos, se debería incrementar un control en cuanto al flujo de aire del sistema, además del de temperatura, que permita una adecuación de la velocidad del aire acorde al rango establecido de 0.2-2 m/s, en conjunto con una resistencia, que, de la misma manera, permita un control del flujo de calor.

- El uso de diferentes muestras en el proceso de deshidratado dificulta de cierta manera el proceso de medición y pesaje al final, al presentar ciertas variaciones

con respecto a una u otra, las cuales son entendibles por diversos factores como algún grosor irregular, geometría diferente, área o peso inicial, razón por la cual se sugiere usar elementos que aporten una mayor precisión al momento de realizar este tipo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. De Michelis y E. Ohaco, "Deshidratación y desecado De Frutas, Hortalizas y Hongos", *INTA Ediciones*, vol. 84, núm. 1667–4014, pp. 4–71, junio de 2012.

[2] H. Sabarez, "Drying of Food Materials", *CSIRO*, p. 9, 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.03416-8.

[3] R. Ruiz, "Diseño de un secador de bandejas para la deshidratación de plátano en la Parroquia Veracruz del Cantón Pastaza", Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, 2016.

[4] D. P. Cardona Tangarife, L. P. Patiño Arias, y A. M. Ormaza Zapata, "Technological aspects of the microencapsulation bioactive food compounds by spray-drying", *Ciencia Tecnologia Agropecuaria*, vol. 22, núm. 1, pp. 1–21, 2021, doi: 10.21930/RCTA.VOL22_NUM1_ART:1899.

[5] J. L. Peinado Martinez y R. Vidal Herrera, "Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica", *CULCyT Tecnología*, vol. 2, núm. 50, pp. 99–107, 2013.

[6] A. V. Mahn, C. Pérez, y A. Reyes, "Efecto de las Condiciones de Secado en Lecho Fluidizado Pulsante sobre el Contenido de Sulforafano de Brócoli", *Información tecnológica*, vol. 28, núm. 4, pp. 17–28, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000400004.

[7] J. M. Tinoco Villa, "Diseño de un sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas", Universidad Continental, Huancayo, 2023.

[8] G. Vega, "Uso de conservantes naturales seguros para alimentos". Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://thefoodtech.com/ingredientes-y-aditivos-alimentarios/conservantes-naturales-y-seguros-su-uso-en-la-industria-alimentaria/

[9] L. E. Japa Paqui, "Efectos de los métodos de deshidratación de frutas sobre sus propiedades nutricionales y sensoriales", Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2022.

[10] Y. Cengel y A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa fundamentos y apliaciones*, 4a ed. Reno: McGrawhill, 2011.

[11] F. Kreith, R. Manglik, y M. Bohn, *Principios de Transferencia de Calor*, 7a ed. Boulder, 2012.

[12] D. V. Guamanquispe Vaca, “Diseño y construcción de un sistema para deshidratar alfalfa para la corporación ecuatoriana parael desarrollo integral productivo CEDINP S. C. C.”, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2022.

[13] E. Martines y L. Lira, “Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos”, en *Simposio de Metrología*, Querétaro, 2010, p. 6.

[14] N. Munier, “Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples”, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2011.

[15] E. Ochoa-Reyes *et al.*, “Tecnologías de deshidratación para la preservación de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.)”, *BIOtecnia*, vol. 15, núm. 2, p. 39, 2013, doi: 10.18633/bt.v15i2.148.

[16] M. Elena Jiménez, M. Del, R. Aguilar, M. De La, L. Zambrano, y E. Kolar, “Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas”, *Revista de la Sociedad Química de México*, vol. 45, núm. 2, pp. 89–92, 2001.

[17] L. Analía Campañone, M. Mackeprang, y C. Alejandro Paola, “Aplicación de energía solar combinada con microondas para la deshidratación de frutas y vegetales”.

[18] J. R. Jiménez Paiva, “Proceso de deshidratación de productos agroindustriales de origen vegetal”, Universidad César Vallejo, Trujillo, 2020.

[19] M. Cacoango, “Estudio de la adaptación y rendimiento de 10 variedades de tomate riñón (Solanum lycopersicum L) bajo invernadero, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2018.

[20] J. R. Coronel León, “Alternativas de Mejora en el Manejo Postcosecha de Tomate Riñón Cultivados en la Provincia de Santa Elena”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.

[21] I. Astiasarán y J. Alfredo Martínez, *Alimentos Composición y Propiedades*, 2a ed. Pamplona: McGrawhill, 2003.

[22] J. N. Hernández Yépez, “Caracterización físico-química y microbiológica del tomate margariteño (Licopersicum esculentum var. España) y evaluación de la efectividad de tratamientos de pre-envasado para el incremento de su vida comercial a temperatura ambiente”, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2013.

[23] F. Pérez Díaz, L. Arévalo Galarza, L. Pérez Flores, R. Lobato Ortiz, y L. Ramirez Guzmán, “Crecimiento y características postcosecha de frutos de genotipos nativos del tomate (Solanum lycopersicum L.)”, *Fitotec*, vol. 43, pp. 89–99, 2020.

[24] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, 7a ed. Reno: McGrawhill, 2012.

[25] A. Monte Perdomo, “Deshidratación de productos alimenticios mediante criodesecación atomosférica”, Universidad del Valle, Cali, 2017.

[26] L. M. Manene, “Los diagramas de flujo: su definición, objetivo, ventajas, elaboración, fases, reglas y ejemplos de aplicaciones.”, 1. Consultado: el 4 de junio de 2024. [En

línea]. Disponible en: http://www.luismiguelmanene.com/...gramas-de-flujo-su-definicion-objetivo-ventajas-elaboracion-fases-reglas-y-ejemplos-de-aplicaciones/[19/08/201302:05:45p.m.]1.-Definición.-

[27] M. de A. GAD, “Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Ambato 2050”, Ambato, 2017.

[28] G. Tungurahua, “Gobierno provincial de Tungurahua”. Consultado: el 14 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://rrnn.tungurahua.gob.ec/red/estaciones/estacion/530b84ed74daaf23bce53cee#

[29] O. Jurado y C. Daiana, “Elaboración de tomate deshidratado”, *Ciencia Sur*, vol. 2, núm. 2518–4792, pp. 56–66, 2016.

[30] V. Guzmán y F. Cornejo, “Efectos de pre tratamientos con sales inorgánicas aplicados previo al proceso de deshidratación del tomate variedad riñón”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2008.

[31] G. Risueño, “Certificado de análisis de laboratorio Tomate de riñón”, Ambato, 2023.

[32] G. Flores, “Certificado de análisis de laboratorio Tomate de riñón deshidratado”, Ambato, 2024.

[33] J. R. Coronel León, “Alternativas de Mejora en el Manejo Postcosecha de Tomate Riñón Cultivados en la Provincia de Santa Elena”, 2009, *Guayaquil*.

[34] I. Astiasarán y J. Alfredo Martínez, *Alimentos Composición y Propiedades*, 2a ed. Pamplona: McGrawhill, 2003. [En línea]. Disponible en: www.FreeLibros.me

[35] J. N. Hernández Yépez, “Caracterización físico-química y microbiológica del tomate margariteño (Licopersicum esculentum var. España) y evaluación de la efectividad de tratamientos de pre-envasado para el incremento de su vida comercial a temperatura ambiente”, 2013, *Córdoba*. [En línea]. Disponible en: www.uco.es/publicaciones

[36] Y. Cengel y A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa fundamentos y apliaciones*, 4a ed. Reno: McGrawhill, 2011.

ANEXOS

Agua..... 94 %
Hidratos de carbono..... 4 %
Grasas..... 0 %
Proteínas..... 1 %
Cenizas..... 0.3 %
Otros (ácidos, vitaminas, etc.)..... 0.7 %

Anexo 1: Propiedades y composición del tomate de Riñón [33]

Tabla 8-3. Composición de algunas hortalizas (% de tejidos fresco, fracción comestible) (*continuación*)

Clase	Peso seco	Compuestos nitrogenados	Hidratos de carbono	Lípidos	Fibra bruta	Cenizas
TUBÉRCULOS RADICALES						
Boniato	30.8	1.6	26.6[b]	0.6	0.9	1.1
Mandioca	35.0	0.9	32.0	0.4	0.8	0.4
BULBOS						
Cebolla	10.9	1.5	8.1	0.3	0.6	0.6
Puerro	14.6	2.2	9.9	0.3	1.3	0.9
Hinojo	14.0	2.4	9.1	0.3	0.5	1.7
TALLOS						
Espárragos	8.3	2.5	4.3	0.1	0.7	0.6
HOJAS Y PECIOLOS						
Ruibarbo	5.2	0.6	3.0	0.2	0.7	0.8
HOJAS						
Escarola	5.6	1.3	2.3	0.2	0.9	1.0
Col	17.3	6.0	7.5	0.9		1.5
Lechuga acogollada	5.1	1.6	1.7	0.3	0.7	0.9
Coles de Bruselas	14.8	4.9	6.7	0.6	1.6	1.2
Lombarda	9.8	2.0	5.9	0.2	1.0	0.7
Espinaca	9.3	3.2	3.7	0.4	0.6	1.5
Repollo	7.6	1.3	4.6	0.2	0.8	0.7
INFLORESCENCIAS						
Alcachofa	14.5	2.9	8.2	0.1	2.4	0.8
Coliflor	9.0	2.7	4.2	0.3	1.0	0.9
Brécol	10.9	3.6	4.4		1.5	1.1
SEMILLAS						
Judías verdes	9.9	1.9	6.1		1.0	0.7
Guisantes	22.0	6.3	12.4		2.0	0.9
FRUTOS						
Berenjena	7.6	1.2	4.7	0.2	0.9	0.6
Calabaza	8.7	1.1	5.5	0.1	1.2	0.8
Pimiento	6.6	1.2	3.4	0.3	1.4	0.4
Pepino	5.9	0.9	2.8	0.2	0.6	0.5
Tomate	6.5	1.1	4.2	0.2	0.5	0.5

[a] Almidón 14.1 [b] Almidón 19.6 y Sacarosa 2.8.
Fuente: Belitz y Grosch (1997).

Anexo 2: Composición de algunos productos usados en la industria alimenticia [34]

Tabla 1. Composición química y nutricional del tomate maduro fresco

Constituyentes	Contenido por cada 100 g
Energía (kJ)	56,00
Constituyentes básicos (g)	
Agua	94,70
Proteína	1,00
Grasa	0,10
Fibra dietética	1,60
Carbohidratos (g)	
Glucosa	0,90
Fructosa	1,00
Sacarosa	0,00
Almidón	0,00
Ácidos orgánicos (g)	
Cítrico	0,43
Málico	0,08
Oxálico	0,00
Otros	0,00
Vitaminas (mg)	
Vitamina C	18,00
Tiamina	0,04
Riboflavina	0,02
Ácido nicotínico	0,70
β-caroteno (equivalente)	0,34
Minerales (mg)	
Potasio	2,00
Sodio	6,00
Calcio	8,00
Magnesio	10,00
Hierro	0,30
Zinc	0,20

Anexo 3: Composición química y Nutricional del tomate maduro fresco [35].

TABLA A-17

Propiedades de la atmósfera a gran altitud

Altitud, z, m	Temperatura, T, °C	Presión, P, kPa	Gravedad, g, m/s^2	Velocidad del sonido, c, m/s	Densidad, ρ, kg/m^3	Viscosidad, μ, kg/m · s	Conductividad térmica, k, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1 000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1 200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1 400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1 600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1 800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2 000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2 200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2 400	−0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2 600	−1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2 800	−3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3 000	−4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3 200	−5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3 400	−7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3 600	−8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3 800	−9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4 000	−10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4 200	−12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4 400	−13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4 600	−14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4 800	−16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5 000	−17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5 200	−18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5 400	−20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5 600	−21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5 800	−22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6 000	−24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6 200	−25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6 400	−26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6 600	−27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6 800	−29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7 000	−30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8 000	−36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9 000	−43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10 000	−49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12 000	−56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14 000	−56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16 000	−56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18 000	−56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Fuente: U. S. Standard Atmosphere Supplements, U. S. Government Printing Office, 1966. Basadas en las condiciones medias redondeadas al año a 45° de latitud y varían con el momento del año y los patrones meteorológicos. Las condiciones al nivel del mar ($z = 0$) se toman como $P = 101.325$ kPa, $T = 15°C$, $\rho = 1.2250$ kg/m^3, $g = 9.80665$ m/s^2.

Anexo 4: Propiedades de la atmósfera a gran altitud [36].









Anexo 5: Evidencias de la aplicación del proceso de deshidratado de tomate

Anexo 6: Propiedades de algunos alimentos comunes [10].

TABLA A-7

Propiedades de alimentos comunes

a) Calores específicos y propiedades en el punto de congelación

Alimento	Contenido de agua,[a] % (masa)	Punto de congelación[a] °C	Calor específico,[b] kJ/kg · K: Arriba del punto de congelación	Calor específico,[b] kJ/kg · K: Debajo del punto de congelación	Calor latente de fusión,[c] kJ/kg
Vegetales					
Alcachofas	84	−1.2	3.65	1.90	281
Espárragos	93	−0.6	3.96	2.01	311
Frijoles	89	−0.7	3.82	1.96	297
Brócoli	90	−0.6	3.86	1.97	301
Col	92	−0.9	3.92	2.00	307
Zanahorias	88	−1.4	3.79	1.95	294
Coliflor	92	−0.8	3.92	2.00	307
Apio	94	−0.5	3.99	2.02	314
Maíz tierno	74	−0.6	3.32	1.77	247
Pepinos	96	−0.5	4.06	2.05	321
Berenjena	93	−0.8	3.96	2.01	311
Rábano	75	−1.8	3.35	1.78	251
Poro	85	−0.7	3.69	1.91	284
Lechuga	95	−0.2	4.02	2.04	317
Hongos	91	−0.9	3.89	1.99	304
Quimbombó	90	−1.8	3.86	1.97	301
Cebollas frescas	89	−0.9	3.82	1.96	297
Cebollas secas	88	−0.8	3.79	1.95	294
Perejil	85	−1.1	3.69	1.91	284
Chícharos frescos	74	−0.6	3.32	1.77	247
Pimientos	92	−0.7	3.92	2.00	307
Papas	78	−0.6	3.45	1.82	261
Calabazas	91	−0.8	3.89	1.99	304
Espinaca	93	−0.3	3.96	2.01	311
Tomate rojo	94	−0.5	3.99	2.02	314
Nabos	92	−1.1	3.92	2.00	307
Frutas					
Manzanas	84	−1.1	3.65	1.90	281
Chabacanos	85	−1.1	3.69	1.91	284
Aguacates	65	−0.3	3.02	1.66	217
Plátanos	75	−0.8	3.35	1.78	251
Moras azules	82	−1.6	3.59	1.87	274
Melones	92	−1.2	3.92	2.00	307
Cerezas ácidas	84	−1.7	3.65	1.90	281
Cerezas dulces	80	−1.8	3.52	1.85	267
Higos secos	23	—	—	1.13	77
Higos frescos	78	−2.4	3.45	1.82	261
Toronja	89	−1.1	3.82	1.96	297
Uvas	82	−1.1	3.59	1.87	274
Limones	89	−1.4	3.82	1.96	297
Aceitunas	75	−1.4	3.35	1.78	251
Naranjas	87	−0.8	3.75	1.94	291
Duraznos	89	−0.9	3.82	1.96	297
Peras	83	−1.6	3.62	1.89	277
Piñas	85	−1.0	3.69	1.91	284
Ciruelas	86	−0.8	3.72	1.92	287
Membrillos	85	−2.0	3.69	1.91	284
Pasas	18	—	—	1.07	60
Fresas	90	−0.8	3.86	1.97	301
Mandarinas	87	−1.1	3.75	1.94	291
Sandías	93	−0.4	3.96	2.01	311
Pescado/mariscos					
Bacalao entero	78	−2.2	3.45	1.82	261
Hipogloso entero	75	−2.2	3.35	1.78	251
Langosta	79	−2.2	3.49	1.84	264
Macarela	57	−2.2	2.75	1.56	190
Salmón entero	64	−2.2	2.98	1.65	214
Camarón	83	−2.2	3.62	1.89	277
Carnes					
Res, canal de	49	−1.7	2.48	1.46	164
Hígado	70	−1.7	3.18	1.72	234
Bistec	67	—	3.08	1.68	224
Lomo	56	—	2.72	1.55	187
Pollo	74	−2.8	3.32	1.77	247
Cordero, pierna de	65	—	3.02	1.66	217
Cerdo, canal de	37	—	2.08	1.31	124
Jamón	56	−1.7	2.72	1.55	187
Salchicha de puerco	38	—	2.11	1.32	127
Pavo	64	—	2.98	1.65	214
Otros					
Almendras	5	—	—	0.89	17
Mantequilla	16	—	—	1.04	53
Queso americano	37	−12.9	2.08	1.31	124
Queso suizo	39	−10.0	2.15	1.33	130
Chocolate con leche	1	—	—	0.85	3
Huevos enteros	74	−0.6	3.32	1.77	247
Miel de abeja	17	—	—	1.05	57
Mantecado	63	−5.6	2.95	1.63	210
Leche entera	88	−0.6	3.79	1.95	294
Cacahuates	6	—	—	0.92	20
Cacahuates tostados	2	—	—	0.87	7
Nueces encarceladas	3	—	—	0.87	10
Nueces	4	—	—	0.88	13

Fuentes: [a] Los datos sobre los contenidos de agua y los puntos de congelación se tomaron del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, versión en el SI (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), cap. 30, tabla 1. Usado con autorización. El punto de congelación es la temperatura a la cual esa congelación se inicia para las frutas y los vegetales, y la temperatura promedio de congelación para los otros alimentos.

[b] Los datos del calor específico están basados en los valores del calor específico del agua y el hielo a 0°C y se determinan con base en las fórmulas de Siebel: $c_{p,\,\text{fresco}} = 3.35 \times (\text{contenido de agua}) + 0.84$, arriba del punto de congelación, y $c_{p,\,\text{congelado}} = 1.26 \times (\text{contenido de agua}) + 0.84$, debajo del punto de congelación.

[c] El calor latente de fusión se determina al multiplicar el calor de fusión del agua (334 kJ/kg) por el contenido de agua del alimento.