

**TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍA E
INDUSTRIA ALIMENTARIA**

**ESTUDIO CUALITATIVO Y NUMÉRICO DE
UN TRATAMIENTO TÉRMICO APLICADO A
UN PRODUCTO DE LA INDUSTRIA
ALIMENTARIA**



Autor: Carlos González Alanís

Tutor:

Dr. José Manuel Salmerón Lissén

Dpto. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 28 de Septiembre de 2016

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. INTRODUCCIÓN.....	4
2.1. La transmisión de calor y sus mecanismos	5
2.2. Tratamientos térmicos aplicados en la industria alimentaria	15
2.3. La uva y sus características	24
2.4. Obtención de uvas pasas	26
2.5. Características y aplicaciones de los productos deshidratados.....	30
3. EL SECADO Y SUS TÉCNICAS	33
4.1. Tradicional	34
4.2. Convencional.....	38
4. CÁLCULOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
5.1 Desarrollo teórico y metodología	40
5.2 Evolución del campo de temperatura y humedad en el secado de una uva.....	57
5.3 Evolución del campo de temperatura y humedad en el secado de n uvas	62
5.4 Evaluación y comparativa de diversos modelo teórico	67
5. CONCLUSIONES.....	76
6. BIBLIOGRAFÍA.....	79
7. ANEXOS.....	81

1. RESUMEN

Con frecuencia, durante el procesamiento, los alimentos se someten a diferentes tratamientos térmicos (deshidratación, esterilización, pasteurización, congelación, refrigeración, etc) con la finalidad de extender su vida comercial o elaborar nuevos productos a partir de las materias primas adecuadas.

Los procesos térmicos pueden ser analizados y estudiados a través de modelos teóricos y empíricos. Hecho que se debe a que muchos de estos se basan en el intercambio de calor y humedad de un fluido (gas/liquido) y los alimentos sólidos. Aunque la mayoría de los modelos de transferencia de calor y masa sólo puede ser resueltos analíticamente para los casos simples, los métodos numéricos son útiles para estimar el comportamiento térmico de los alimentos en condiciones complejas, pero realistas.

En el presente trabajo se desarrolla el estudio teórico y cualitativo de un tratamiento térmico de secado aplicado sobre un producto de la industria alimentaria como es la uva, a través de los mecanismos de transferencia de calor involucrados, con el objetivo de dar a conocer algunas de las herramientas teóricas y cualitativas que nos permiten describir el comportamiento de los alimentos ante estos procesos, así como los principios que los rigen y algunas limitaciones. Un tratamiento caracterizado por una doble finalidad; generar un nuevo producto (pasas de uvas) y aumentar la vida comercial del mismo.

Se realiza para ello un estudio que a diferencia de la termodinámica que estudia la transferencia de energía térmica entre estados de equilibrio, se encarga del estudio de esa misma transferencia pero entre estados de no equilibrio (en instantes distintos al de la posición de equilibrio inicial y final).

Este estudio se ha aplicado considerando un secado natural/solar de la uva a 25°C (considerando solo convección y convección + radiación), así como para un secado artificial/convencional a diferentes temperaturas (50, 60 y 70°C), con el objetivo de visualizar gráficamente si existe grandes diferencias entre ambos métodos de secado. Tanto en una uva aislada como en n uvas.

Para obtener el campo de Temperaturas se empleó la ecuación general de transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Mientras que para analizar el comportamiento de la uva en el proceso de secado se obtuvo la pérdida de humedad en función del tiempo, haciendo uso de la analogía calor-masa.

$$\frac{Nu}{Pr^n} = f(x^*, Re_L) = f(x^*, Re_L) = \frac{Sh}{Sc^n}$$

Resultados que finalmente se compara con algunos de los modelos de capa delgada que contribuyen a la comprensión de las características de secado de los materiales agrícolas.

2. INTRODUCCIÓN

El término industrias alimentarias abarca un conjunto de actividades industriales dirigidas al tratamiento, la transformación, la preparación, la conservación y el envasado de productos alimenticios, por lo general, de origen vegetal o animal y producidos en explotaciones agrarias, ganaderas y pesqueras.

La industria alimentaria actual ha experimentado un intenso proceso de diversificación y comprende desde pequeñas empresas tradicionales, a grandes procesos industriales altamente mecanizados.

Las reacciones químicas o bioquímicas, así como el desarrollo microbiano, acortan la vida útil de los alimentos. Hoy por hoy no se dispone de ninguna técnica que permita su conservación indefinida en condiciones óptimas, aunque sí se pueden estabilizar alimentos envasados durante periodos razonablemente largos de tiempo, tanto a la temperatura ambiente (deshidratación, esterilización) como en condiciones especiales de almacenamiento (pasteurización, congelación, refrigeración). El desarrollo tecnológico se ha orientado tanto a la introducción de mejoras en las técnicas tradicionales, como a la utilización combinada de algunas de ellas y a la búsqueda de nuevas tecnologías de estabilización por agentes físicos (frío, radiaciones, plasmas o altas presiones).

Con frecuencia, durante el procesamiento, los alimentos se someten a diferentes tratamientos térmicos*, con la finalidad de extender su vida comercial o elaborar nuevos productos a partir de las materias primas adecuadas.

* Tratamiento térmico: conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad y presión.

2.1. La transmisión de calor y sus mecanismos (1)

Los procesos térmicos pueden ser analizados y estudiados a través de modelos teóricos y empíricos. Hecho que se debe a que muchos de estos se basan en el intercambio de calor y humedad de un fluido (gas/liquido) y los alimentos sólidos. El proceso mediante el cual se transmite energía de un medio o material a otro de menor temperatura se conoce con el nombre de transferencia de calor, y se modela mediante la ecuación de conducción de calor de Fourier, y la humedad por la ley de difusión de Fick.

$$q = -k \nabla T$$

Ley de Fourier

$$J = -D \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ley de Fick

Donde q es la tasa de transferencia de calor, ΔT es el gradiente de temperatura, entre el medio que transfiere calor y el alimento, y k es el coeficiente de transferencia de calor. J es el flujo difusivo, D es el coeficiente de difusión o difusividad, ϕ es la concentración y x la posición.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Los tratamientos térmicos tradicionales generalmente involucran mecanismos de conducción y convección, mientras que las nuevas tecnologías, utilizan la radiación principalmente como mecanismo de transferencia de calor.

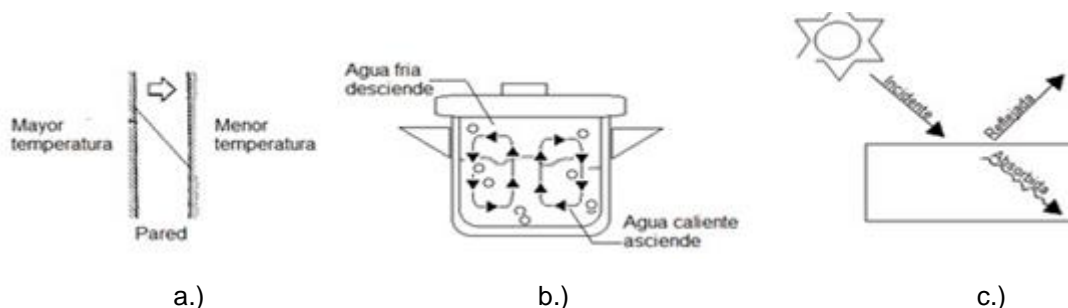


Figura 1. Esquemas de transferencia de calor: a.) conducción, b.) convección y c.) radiación.

Mecanismos de transferencia de calor

- Conducción

La conducción de calor o transmisión de calor por conducción es el proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por lo que siempre que existe un gradiente de temperaturas en un medio sólido, el calor fluirá desde la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura debido a la agitación térmica de las moléculas.

La ecuación que describe la conducción térmica se conoce como ley de Fourier. La cual establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección.

Una ecuación que puede ser expresada de las siguientes formas;

$$J = K \frac{\partial T}{\partial x} \qquad q = -k \nabla T \qquad \frac{dQ_s}{dt} = \int_s q \, dS = -k \int_s \nabla T \, dS$$

Diferencial

Vectorial

Integral

Donde:

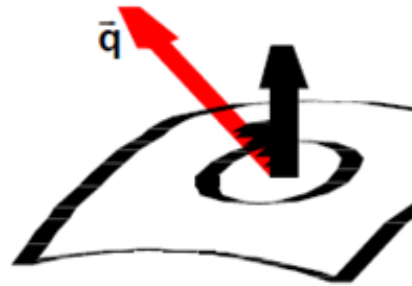
- J: es la densidad de corriente de energía (J/s).
- q: es el vector de flujo de calor por unidad de superficie (W/m²).
- k: es una constante, denominada conductividad térmica (W /m¹·K¹).
- ΔT: es el gradiente de temperatura en el interior del material (K / °C).
- Q: calor transmitido (W).
- S: Superficie de transferencia de calor. (m²)

Entre las consideraciones a tener en cuenta y que establece la ley de Fourier:

1. Es experimental.
2. En cada punto de un sólido existe un campo escalar (una función escalar de las coordenadas) de temperaturas.

Figura 2. Campo vectorial \vec{q} .

3. El campo vectorial, aquel que tiene como dirección la de la normal al elemento de superficie en la orientación del flujo máximo, y que por sentido tiene el del flujo de calor y por módulo el flujo máximo de calor que atraviesa el elemento de superficie por unidad de área, se conoce como densidad de flujo de calor y cuantifica el flujo de calor en un punto conocido el gradiente de temperaturas en dicho punto.



$$\vec{q} = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k} \quad \begin{cases} q_x = -k(x, y, z, T) \partial T / \partial x \\ q_y = -k(x, y, z, T) \partial T / \partial y \\ q_z = -k(x, y, z, T) \partial T / \partial z \end{cases}$$

La densidad de flujo (imagen en color) y por tanto la transferencia de calor será mayor (vectores de mayor tamaño) conforme mayor sea la pendiente en la isoterma* (imagen en azul) de un cuerpo para iguales incrementos de temperatura.

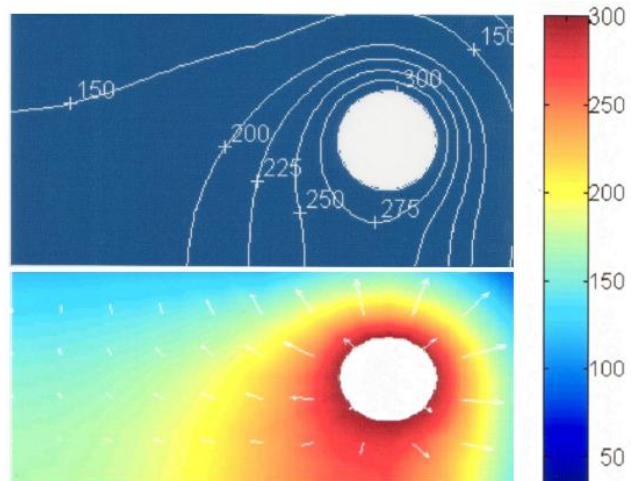
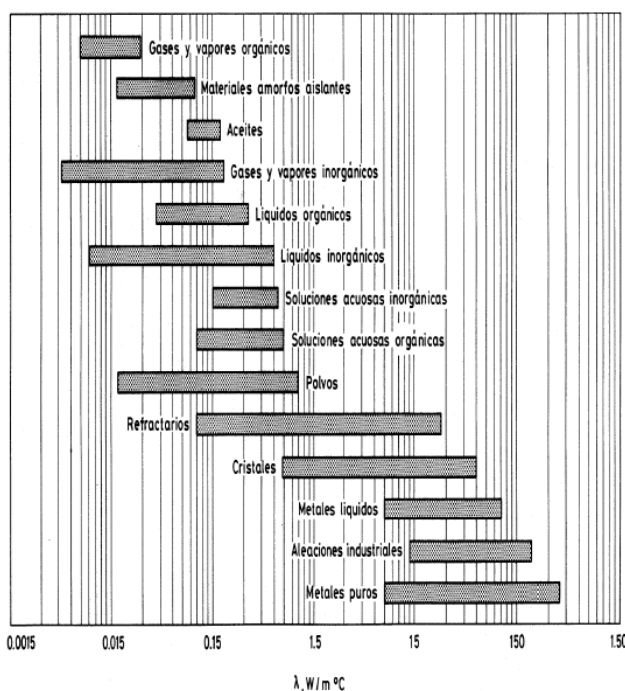


Figura 3. Isoterma y densidad de flujo.

* Isoterma: es el lugar geométrico de los puntos del sistema que poseen la misma temperatura en un instante "t" considerado.

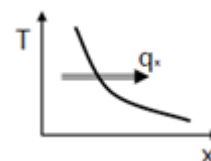
4. La conductividad térmica (k) es una propiedad intrínseca de los materiales que varía en función de la temperatura a la que se encuentre la sustancia, e indica la capacidad del material para conducir calor por conducción. Se determina experimentalmente y puede depender de otros factores como:



- Composición química, fase, estructura cristalina.
- Temperatura, Presión.
- Carácter homogéneo o no homogéneo del material.
- Es elevada en metales, y baja en los gases y en materiales iónicos y covalentes por eso aislantes térmicos.

Figura 4. Conductividad térmica de diversos materiales.

5. El signo negativo en la ecuación indica que el flujo de calor fluye en el sentido de las temperaturas decrecientes.



6. Se puede establecer una analogía eléctrica, al definir al sistema como una resistencia térmica con el flujo de calor análogo a la corriente eléctrica y la diferencia de temperaturas análoga a la diferencia de potencial. Dicho circuito verificará una ley que, a semejanza de la ley de Ohm, expresa:

En un circuito
$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Flujo de calor $Q = q A = \frac{\Delta T}{R}$ Diferencia de Temperatura
Resistencia térmica

$$q = \frac{\Delta T}{R} / R = \frac{L}{kA}$$

Estas y el resto de ecuaciones pueden generalizarse para otras geometrías, siempre que el problema sea estacionario ($T = \text{cte}$ en el tiempo).

	Placa plana	Capa cilíndrica	Capa esférica
Ecuación diferencial	$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$	$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0$	$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0$
Distribución de temperaturas	$T_{s,1} - \Delta T \frac{x}{e}$	$T_{s,1} - \Delta T \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$	$T_{s,1} - \Delta T \left[\frac{1 - (r_1/r)}{1 - (r_1/r_2)} \right]$
Flujo de calor (q)	$k \frac{\Delta T}{e}$	$\frac{k \Delta T}{r \ln(r_2/r_1)}$	$\frac{k \Delta T}{r^2 \left[(1/r_1) - (1/r_2) \right]}$
Transferencia de calor (Q)	$kA \frac{\Delta T}{e}$	$\frac{2\pi L k \Delta T}{\ln(r_2/r_1)}$	$\frac{4\pi k \Delta T}{(1/r_1) - (1/r_2)}$
Resistencia térmica ($R_{t,CD}$)	$\frac{e}{kA}$	$\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k}$	$\frac{(1/r_1) - (1/r_2)}{4\pi k}$

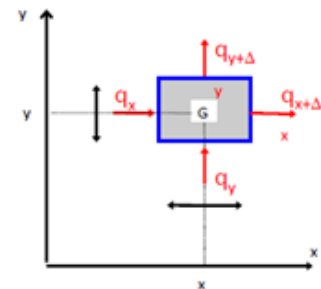
Nota: $\Delta T = T_{s,1} - T_{s,2}$, e : espesor de placa plana, r_1 : radio interno, r_2 : radio externo,
 L : longitud de la capa cilíndrica

En el caso de que el sistema no sea estacionario, la aplicación del primer principio de la termodinámica y la ley de Fourier nos permitirá determinar cómo varía la temperatura de un sistema con el tiempo $T(t)$ a partir de la que se conoce como la ecuación general de transferencia cuya deducción y expresión se muestra a continuación:

Supuesto un elemento diferencial de un sólido no isoterma bidimensional.

Hipótesis:

- Sólido Homogéneo e Isotrópico.
- Propiedades constantes.
- No existen movimientos relativos entre las partes.
- Variaciones de volumen pequeñas en relación con el volumen.



LEY DE FOURIER

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_{x+\Delta x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot \Delta x + \dots$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_{y+\Delta y} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \cdot \Delta y + \dots$$

PRIMER PRINCIPIO

$$Q_{\text{Entra}} + Q_{\text{Generado}} = Q_{\text{Sale}} + \Delta E_{\text{Interna}}$$

$q_x \Delta_y + q_y \Delta_x$ $G \cdot \Delta_x \Delta_y$ $q_{x+\Delta x} \cdot \Delta_y + q_{y+\Delta y} \cdot \Delta_x$ $\rho C_p \Delta_x \Delta_y \frac{\partial T}{\partial t}$

SUSTITUYENDO:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Se obtiene la ecuación general de transferencia de calor, una ecuación diferencial en derivadas parciales que describe la distribución de calor al reflejar el balance entre el flujo neto de calor, el calor generado y el calor almacenado en el material.

- Convección

La convección es otra de las formas de transferencia de calor, caracterizada porque se produce en la interfase de un sólido/fluido y un medio fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Originándose simultáneamente difusión y transporte de masa. Para lo cual ha de cumplirse y tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. En la Interfase no existe desplazamiento, ni mezcla en caso de fluidos/sólido, y si un equilibrio termodinámico.
2. El mecanismo se inicia por difusión en el fluido a través de la interfase. Teniendo en cuenta que la conductividad de los fluidos es pequeña, la resistencia conductiva será controlante.
3. La eficiencia de la convección depende del transporte. Al aumentar la velocidad del fluido aumenta la transferencia de calor y/o masa por convección.

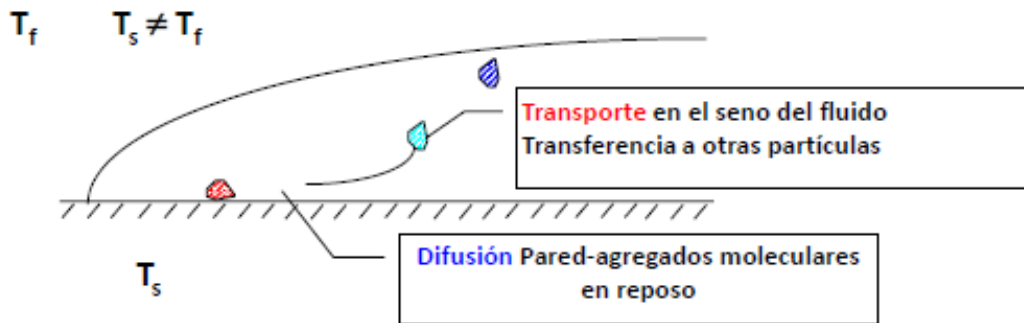


Figura 5. Esquema del transporte convectivo de calor.

El fluido puede moverse sobre la superficie impulsado por una fuerza externa en cuyo caso se trata de una convección forzada, o puede simplemente alejarse de la superficie impulsado por una diferencia de presiones, en cuyo caso se trata de convección natural. Esta (según el origen del movimiento) es una de las principales características que define un problema convectivo, sin embargo también puede clasificarse teniendo en cuenta otras características como:

- El régimen del flujo: Laminar / Turbulento.
- El confinamiento: Flujo interno/ Flujo Externo.
- La naturaleza del proceso: Con cambio de fase / Sin cambio de fase.

Tanto en la convección forzada como en la natural, actúan dos mecanismos. Suponiendo que el sólido está a mayor temperatura que el fluido el mecanismo que se observa en la interfase entre ambos es el de conducción: las moléculas de la superficie sólida transmiten energía cinética a las moléculas del fluido que se encuentran cerca de la interfase y la transferencia de calor verifica la ecuación de Fourier, evaluada en la interfase:

$$q_c = -k_{\text{fluido}} A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$$

El segundo mecanismo de transferencia de calor, involucra el movimiento macroscópico de fracciones de fluido cuyas moléculas “arrastran” el calor a regiones alejadas de la superficie y que se encuentran a temperaturas más bajas. De igual forma ocurriría si el sólido estuviese a menor temperatura que el fluido.

Tomando en cuenta ambos mecanismos, la potencia calorífica que se transfiere por convección es proporcional al área de contacto entre el sólido y el fluido y a la diferencia de temperaturas de la superficie (T_s) y la del fluido en un punto alejado de esa superficie (T_∞), siendo h la constante de proporcionalidad, llamado coeficiente de convección o coeficiente de película. Una expresión fenomenológica que surge de la Ley de enfriamiento de Newton y se expresa de la siguiente forma:

$$q_c = h A (T_s - T_\infty)$$

Donde h depende de la velocidad del fluido, de la forma de la superficie, así como de las propiedades físicas del fluido. Presentando los siguientes valores en función de las características del proceso convectivo:

Proceso		h (W/m ² K)
Convección libre	Gases	2-25
	Líquidos	50-1000
Convección forzada	Gases	25-250
	Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase		-
Ebullición y condensación		2500-100000

Cuanto mayor sea el valor de “ h ” más próximo en un tiempo dado “ t ” estarán las temperaturas del fluido y el sólido implicados en el proceso convectivo.

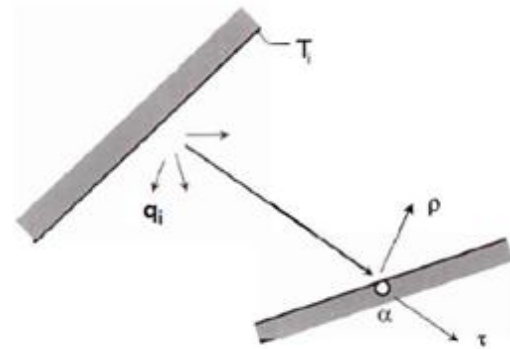
Así, de forma análoga a la transmisión de calor por conducción, dado el coeficiente h , se puede definir una resistencia térmica de convección:

$$q_c = \frac{(T_s - T_\infty)}{R_c} \quad / \quad R_c = \frac{1}{h A}$$

- Radiación

Figura 6. Esquema de la Radiación

La radiación es el mecanismo que implica la transferencia de energía radiante de una fuente a un receptor a través del vacío o un medio material. Cuando esto sucede parte de la energía es absorbida por el receptor, lo que genera un aumento de temperatura en el mismo, como cuando se expone un material al sol o cuando un alimento se calienta en horno de microondas.



Una característica propia de este mecanismo de transmisión de calor es que no requiere de medio de transporte (se puede transmitir en el vacío).

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada. En lo que respecta a la transferencia de calor la radiación relevante es la comprendida en el rango de longitudes de onda de $0,1\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$, abarcando por tanto la región infrarroja del espectro electromagnético. La materia en un estado condensado (sólido o líquido) emite un espectro de radiación continuo. La frecuencia de onda emitida por radiación térmica es una función que depende solo de la temperatura.

La teoría que permite modelar la potencia emitida por un cuerpo a temperatura T , se relaciona estrechamente con la radiación de un cuerpo negro*. La cual suele ser descrita como:

$$E = \sigma \cdot T_e^4 \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^{-4}}$$

Donde T_e es la temperatura efectiva, es decir, la temperatura absoluta de la superficie y sigma es la constante de Stefan-Boltzmann

La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \varepsilon \sigma \cdot T_e^4$$

Donde epsilon (ε) es una propiedad radiactiva de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie.

Siendo la cantidad de energía, donde F es el factor de intercambio de radiación radiante, intercambiada entre dos cuerpos expresada de la siguiente forma:

$$Q = F \varepsilon A \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Por tanto, el flujo de calor por radiación depende de las temperaturas del emisor y del receptor y no sólo de la diferencia entre ambas.

*Cuerpo negro: es una cavidad que emite radiación con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann.

2.2. Tratamientos térmicos aplicados en la industria alimentaria

Existen multitud de técnicas y procesos para la elaboración, mejorar la calidad y la seguridad de los productos alimenticios, u extender la vida útil de los mismos. No obstante los más usuales o de importancia en la industria alimentaria son aquellos que incluyen la transferencia de calor/frío analizada en el apartado anterior, es decir, la concentración (evaporación y deshidratación), escaldado, esterilización, concentración por crioconcentración, refrigeración y congelación. En esta sección se recogen algunos detalles acerca de los mismos.

Técnicas con transferencia de calor (2)_(3)

El calor influye sobre el alimento modificando sus propiedades físicas (densidad, viscosidad, solubilidad, difusividad, conductividad, tensión superficial, etc.), acelerando las reacciones químicas, desnaturalizando las proteínas, favoreciendo la formación de hidrocoloides de biopolímeros en presencia de agua (almidón, gelatina...)... y todo ello afecta a la calidad positiva o negativamente (ablandamiento, modificaciones del color, aparición de sabores, pérdida de nutrientes...).

El par temperatura-tiempo real de operación, el baremo, tiene que determinarse experimentalmente, ya que la transmisión del calor depende del tipo de instalación, de la temperatura de partida, de las características del alimento, de si está envasado o no, del tamaño y tipo del envase (material, rigidez...), de cómo se transmite el calor, etc. En envases rígidos se determina en base a la temperatura del 'punto frío' (aquel que tarda en calentarse más que el resto), que solamente coincide con el centro geométrico cuando el calor se transmite por conducción (sólidos) y no depende de la posición.

Pero cuando hay líquidos puede haber convección: la convección es natural si el envase está en reposo y el punto frío se localiza en el segmento que une el centro geométrico y el punto de apoyo, pero si el envase está en movimiento la convección es forzada y al haber cierto grado de mezcla la temperatura del alimento es más uniforme.

La convección puede verse afectada por la presencia de sólidos, su forma y su disposición (figura 1). La transmisión del calor por conducción es la más lenta, seguida de la convección natural, siendo la más rápida la convección forzada.

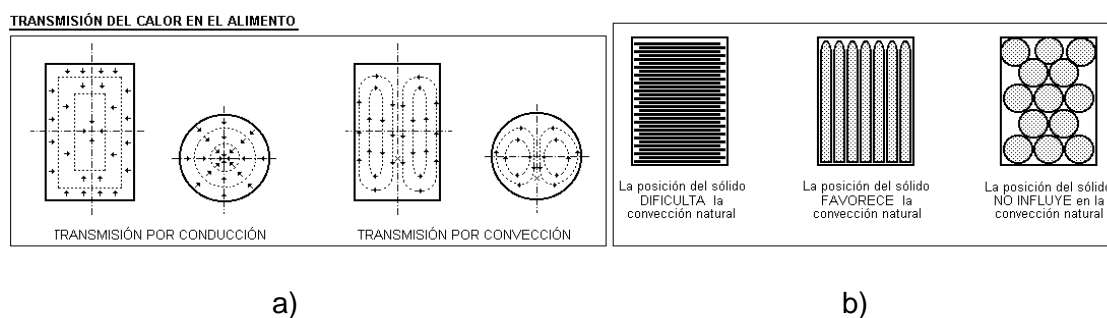


Figura 7. a) Modificación del punto frío en función del fenómeno de transmisión de calor. b) influencia de la posición sobre la transmisión de calor por C. Natural.

Las condiciones operativas deben determinarse experimentalmente en cada caso particular, aunque hay baremos orientativos de algunas asociaciones de fabricantes (AICV: Asociación de investigación de conservas vegetales, España; NCA: National Cannery Association, EE.UU., etc.) en los que se puede ver cómo influye el tamaño del envase, el material, la posición, etc.

A continuación se describen algunas de las técnicas de la industria alimentaria que precisan de la transferencia de calor.

Concentración

Consiste en separar agua de un alimento líquido hasta dar un líquido más denso y viscoso (el 'concentrado'), con lo que se reduce el volumen y los costes de almacenamiento y transporte. La concentración reduce a_w (actividad de agua) y suele ser un paso previo en la elaboración de alimentos deshidratados.

La concentración se puede llevar a cabo con (evaporación y deshidratación) o sin transferencia de calor (ultrafiltración y ósmosis inversa), aunque en esta sección solo se profundizará en aquellas con transferencia de calor.

- Evaporación

Cuando en un evaporador se lleva una disolución hasta su punto de ebullición, el disolvente se vaporiza y el líquido se concentra. Un evaporador consta de un cambiador de calor (con vapor) y de un separador de vapores (cámara ensanchada o con obstáculos, ciclón...). Se minimiza el daño térmico bajando la temperatura de ebullición (función de la presión de trabajo, del tipo de soluto y de su concentración) y con una alta velocidad de evaporación (aumenta con el área superficial de la pared de intercambio, con su conductividad y con la turbulencia del líquido y disminuye con el espesor de pared). Los aromas, volátiles, van con los vapores, pero se pueden recuperar.

- Deshidratación

La deshidratación es una técnica en la que un alimento (sólido o líquido) se puede deshidratar vaporizando el agua hasta dar un sólido, para hacerlo más estable o a fin de acondicionarlo para alguna etapa posterior.

El sólido resultante ('deshidratado') debe guardarse en recipientes impermeables al vapor de agua (su a_w es inferior a la humedad relativa del aire), opacos (si hay lípidos autooxidables) y sin aire (se oxida fácilmente). Esta se puede llevar a cabo por secado o por criodeshidratación (liofilización).

En el secado el alimento cede agua a un aire seco (frío o caliente). La cinética mejora si se disminuyen las resistencias (reducción de tamaño, régimen turbulento) y el aire es caliente y circula en contracorrientes.

En la liofilización (figura 8) primero se congela el agua y posteriormente se sublima el hielo formado trabajando por debajo del punto triple. A baja presión, lo normal es operar en discontinuo y el calentamiento tiene que efectuarse por conducción o por radiación (no hay convección en ausencia de un fluido). El alimento sufre menos daño térmico, mantiene la forma y es fácilmente rehidratable, pero el coste es elevado.

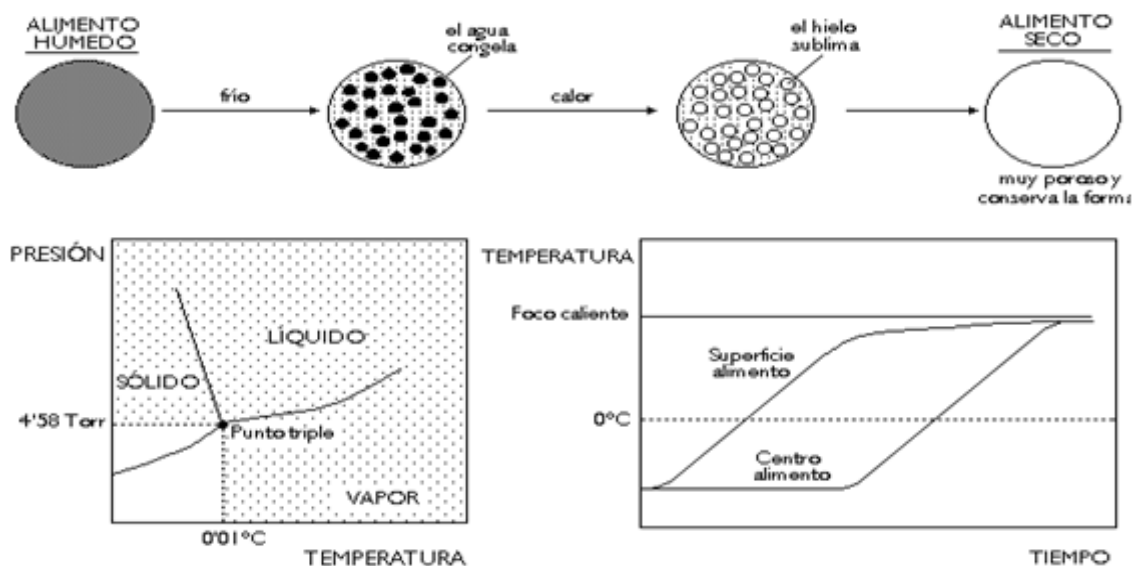


Figura 8. Esquema del proceso de liofilización.

Escaldado

Calentamiento de las materias primas para inactivar enzimas (oxidasas, pectinasas...), que también aumenta la permeabilidad de las membranas al desnaturalizar sus proteínas. Suele hacerse de forma continua a una temperatura moderada y constante, aunque a veces se aplican programas tiempo-temperatura. Efectos secundarios son ablandamiento de tejidos, expulsión de aire o extracción de solutos: la pérdida de solutos se evitaría calentando con vapor, pero el control es mejor si se calienta con agua.

Pasteurización

Tratamiento para inactivar formas vegetativas de microbios patógenos y banales. Se aplica de modo continuado y a temperatura constante $<100^{\circ}\text{C}$.

Esterilización técnica o comercial

Tratamiento para inactivar los microbios perjudiciales y/o sus esporas. En tanto el envase se mantenga herméticamente cerrado, su vida comercial a temperatura ambiente es prolongada. Se trata durante el tiempo necesario a una temperatura constante. Si el pH del alimento es de 4,6 o menor (frutas en general), puede llevarse a cabo a 100°C en agua hirviendo, pero si es mayor de 4,6 (hortalizas, leche, carnes, pescados) hay que calentar a más de 100°C (bajo presión, en autoclaves*). Cuando se hace tras envasar el producto, se denomina 'appertización'.

* Autoclaves: recipiente metálico de paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar a alta presión, lo que permite que el agua alcance temperaturas superiores a los 100°C , para realizar una cocción o una esterilización con vapor de agua.

Técnicas con transferencia de frío (4)_(5)

Hay dos técnicas de estabilización mediante el frío: la refrigeración y la congelación. En la primera los efectos se deben únicamente a la bajada de temperatura, mientras que en la segunda al efecto de la temperatura se superpone el descenso de aw. Estas técnicas obligan a mantener la 'cadena de frío', lo que implica consumo energético y el aislamiento total de las instalaciones (paredes, techo y suelo).

Refrigeración

Al bajar la temperatura se reducen las movilidades iónica y molecular, con lo que se retardan las reacciones químicas o bioquímicas, pero no se detienen. El decrecimiento de la actividad microbiana cuando se enfría por debajo de la temperatura óptima es menos acusado que el que provoca el calentamiento.

Los enzimas siguen activos y pueden tener lugar oxidaciones, pardeamientos, hidrólisis.... El frío tampoco detiene la germinación, sólo la retrasa.

En la industria se produce frío vaporizando un líquido (generalmente amoníaco). En un circuito cerrado esto se hace en un cambiador de calor (el 'evaporador') y el gas resultante se lleva hasta otro cambiador (el 'condensador') donde se licúa para recircularlo. Mientras que el aire es el fluido intermedio más utilizado. Al ser más denso el aire frío, los evaporadores suelen colocarse en alto.



Figura 9. Evaporador.

Congelación

La bajada de temperatura afecta a las propiedades físicas: aumentan la densidad, la tensión superficial y la viscosidad de los líquidos, así como la solubilidad de los gases, aunque tienden a insolubilizarse otros solutos. El enfriamiento facilita la reducción de tamaño de los sólidos, pues aumenta su fragilidad y les da más firmeza.

Los alimentos tienen una composición compleja y carecen de un punto de fusión definido, aunque la mayoría congela entre 0°C y -5°C . Como son ricos en agua, al ir bajando la temperatura va solidificando parte de ella, y queda un líquido residual cada vez más concentrado, cuyo punto de congelación es progresivamente menor.

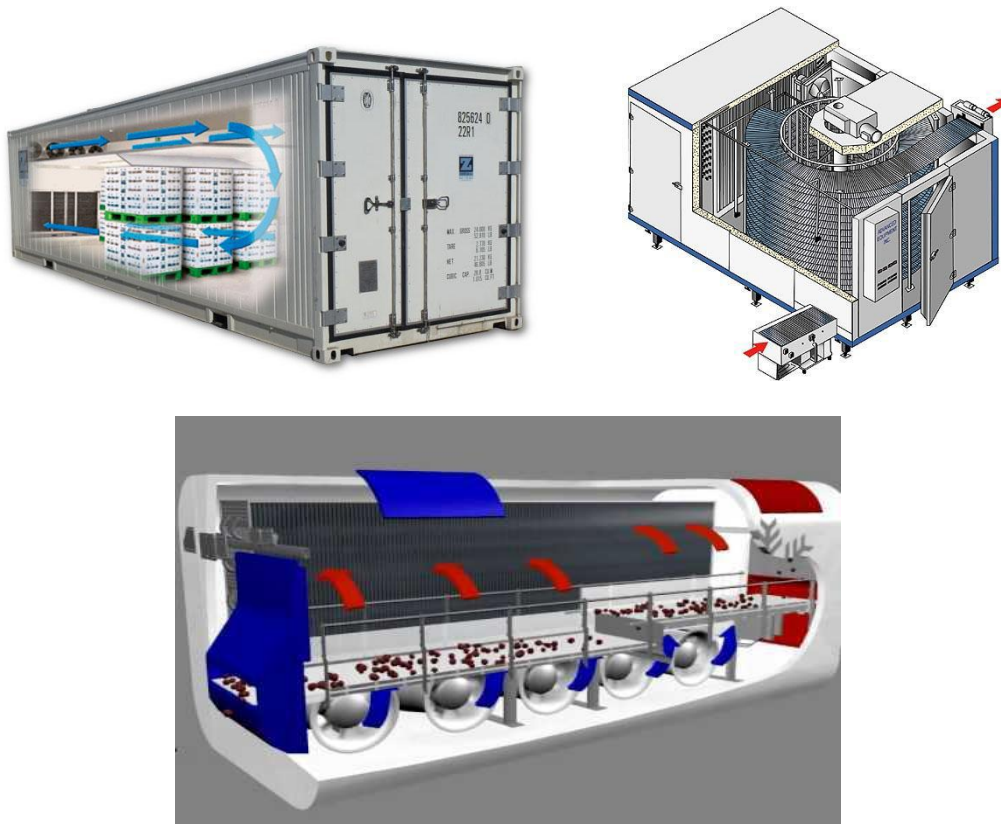


Figura 10. De izquierda a derecha: cámara de congelación, abatidor y túnel de congelación.

La velocidad de enfriamiento es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre alimento y foco frío e inversamente proporcional a las resistencias (de la película estacionaria de fluido que rodea al alimento, del recubrimiento, de la envoltura, del envase o del tamaño del alimento). En los túneles de congelación (continuos) y en los abatidores de temperatura ('blast-freezers', discontinuos) el alimento se pone en contacto con aire muy frío que circula en régimen turbulento.

- Crioconcentración

La alternativa a la concentración por evaporación o deshidratación, ya mencionada, es lo que se conoce como crioconcentración. Una técnica donde se comienza por provocar la formación de microcristales de disolvente ('nucleación'), por generación de frío, que luego se dejan crecer ('maduración') y se separan las fases (los cristales grandes retienen menos concentrado).

Sin embargo, el coste energético es elevado y es difícil separar las fases si la viscosidad del concentrado es alta, pero permite concentrar disoluciones acuosas en solutos más volátiles que el agua y la calidad del producto es muy buena, al no existir daño térmico.

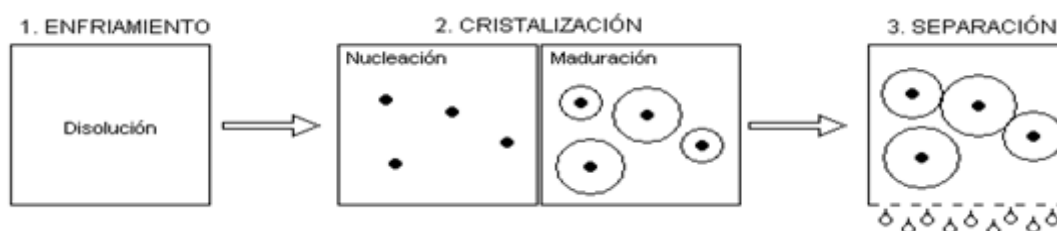


Figura 11. Esquema del proceso de crioconcentración

Los fenómenos de transferencia de calor tienen un papel importante en muchos problemas industriales, como ya se ha descrito, no hay una sola aplicación en esta área que no implique efectos de transferencia de calor (*"la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura"*) de alguna manera.

La mayoría de los modelos de transferencia de calor y masa sólo puede ser resueltos analíticamente para los casos simples. Los métodos numéricos son útiles para estimar el comportamiento térmico de los alimentos en condiciones complejas, pero realistas, tales como la variación de la temperatura inicial, no lineal, propiedades térmicas no isotrópica, cuerpos de forma irregular y condiciones de contorno dependientes del tiempo.

En este sentido, la diferencia finita y métodos de elementos finitos (6) son los métodos más usados para la resolución de los modelos.

La tecnología de modelado numérico ofrece una eficiente y poderosa herramienta para la simulación del calentamiento / refrigeración de procesos de la industria alimentaria. Los modelos numéricos suponen un ahorro económico y de tiempo, así como se pueden utilizar para producir una información valiosa sobre los procesos de calentamiento / enfriamiento de alimentos bajo amplias condiciones experimentales, mientras que los experimentos tradicionales sólo pueden restringirse a una serie de condiciones especiales debido al coste experimental y límite de tiempo. Siendo estos últimos necesarios para la validación de los modelos numéricos.

Por tanto, la industria alimentaria se beneficia de la modelización numérica del análisis de los procesos para una mejor comprensión de los complejos mecanismos físicos que subyacen a los procesos, la evaluación de los procesos para asegurar la seguridad y calidad de los productos alimenticios, el diseño y la optimización de los procesos y los sistemas alimentarios y control de los procesos.

En el presente trabajo se desarrolla el estudio teórico y cualitativo de un tratamiento térmico de secado, descrito en esta misma sección, aplicado sobre un producto de la industria alimentaria como es la uva.

Un tratamiento caracterizado por una doble finalidad; generar un nuevo producto (pasas de uvas) y aumentar la vida comercial del mismo. Siendo para ello necesario recurrir a una serie de datos empíricos, ecuaciones y aproximaciones, que en la sección de “cálculos, resultados y discusión” de este mismo trabajo se recogen con los detalles precisos.

2.3. La uva y sus características

A efectos del Código Alimentario español, “se entiende por uva, el fruto de la vid maduro o sobremaduro en la misma cepa o soleado después de la vendimia”. Una fruta no climatérica* que crece en enredaderas perennes y de hojas caducas del género *Vitis***, y se clasifica como fruta carnosa ya que posee en su composición un porcentaje de agua superior al 50%, concretamente alrededor del 89%.

En cuanto a sus características más notables:

- Las uvas crecen agrupadas en racimos de entre 6 y 300 uvas con un diámetro promedio de 1,6 cm y un peso de 200-350 g, en los que el denominado raspón o escobajo (2 - 4% peso del racimo) constituye la estructura de soporte, y los pedicelos (o pinceles) son los elementos que sostienen los granos en las ramificaciones estructurales del raspón.

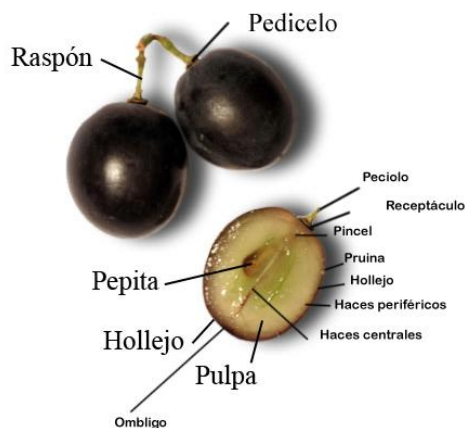


Figura 12. Secciones y partes de una uva

* No climatérico: vegetales que con el tiempo disminuyen su actividad respiratoria.

** *Vitis*: es un género con alrededor de 60 especies aceptadas, de las casi 800 descritas, perteneciente a la familia Vitaceae. Su importancia económica se debe al fruto, la uva, utilizada tanto para consumo directo como fermentada para producir vino

- Su pulpa, que representa la mayor proporción del fruto (80%), constituye la parte más aprovechable, tanto para su consumo directo como para la elaboración de zumo o vino. Como fruta seca se denomina pasa.
- Pueden ser negras, moradas, amarillas, doradas, púrpura, rosadas, marrones, anaranjadas o blancas en función de diversas condiciones; variedad, región, climatología, terruño, etc.
- Presentan un alto contenido (9-20%) de azúcar (Glu y Fru) que aportan calorías al organismo y contenido de humedad (89%), lo que la hacen muy sensibles al deterioro microbiano durante su almacenamiento. De aquí, que después de la cosecha deban ser consumidas o transformadas en diversos productos, con el fin de reducir las pérdidas económicas.
- Contienen grandes cantidades de fitoquímicos* entre los que se incluyen compuestos fenólicos (en hollejos y tejidos adyacentes), vitaminas (ácido fólico y vitamina B₆), flavonoides, antocianinas, ácidos tartáricos/ málicos y el resveratrol, que ofrecen beneficios para la salud. Las uvas son una de las principales fuentes dietéticas de antocianinas, responsables de la coloración negra, roja y púrpura de las uvas. Así como de su actividad antioxidante, anti-inflamatoria, anticancerígena, beneficios y efectos sobre la visión, el colágeno, la agregación de plaquetas en la sangre y la permeabilidad capilar y fragilidad. Mientras que por otro lado las vitaminas son las responsables de la producción de glóbulos rojos y blancos, la síntesis de material genético, la formación de anticuerpos del sistema, y ayuda a mantener las funciones habituales del cerebro (vitamina B₆).
- Su contenido en fibra (pectinas en la piel) les confiere propiedades como suave laxante; se recomienda en personas que sufren estreñimiento.

* Fitoquímicos: sustancias que se encuentran en los alimentos de origen vegetal, biológicamente activas, que no son nutrientes esenciales para la vida, pero tienen efectos positivos en la salud.

- Constituye uno de los principales "alimentos desintoxicantes", ideal para realizar curas tomando exclusivamente este fruto. Razón que se debe fundamentalmente a su riqueza en potasio (abundante en las uvas pasas ó pasas) que controla el equilibrio de los líquidos en el organismo y sus niveles bajo de sodio.

Finalmente, a modo de resumen en la tabla siguiente se adjunta los valores composicionales que otorgan a las uvas las características comentadas.

Composición en 100 gramos de porción comestible	
<i>Calorías</i>	63-67
<i>Hidratos de carbono</i>	16,1 - 15,5 (g)
<i>Fibra</i>	0,4 – 0,9 (g)
<i>Potasio</i>	250 – 320 (mg)
<i>Magnesio</i>	4 – 10 (mg)
<i>Calcio</i>	4 – 17 (mg)
<i>Vitamina B6</i>	0,1 (mg)
<i>Provitamina A</i>	3 (µg)
<i>Ácido Fólico</i>	16 – 26 (µg)

2.4. Obtención de uvas pasas

Según la NORMA DEL CODEX PARA LAS UVAS PASAS STAN 67-1981 (7).

“Las uvas pasas son el producto preparado con uvas secas sanas de variedades que se ajustan a las características de *Vitis vinifera* L. (con exclusión de las pasas de Corinto) elaboradas en una forma apropiada para obtener uvas pasas comercializables, con o sin recubrimiento con ingredientes facultativos adecuados.”



Figura 13. Uvas pasas.

La obtención de las uvas pasas se inicia con el cultivo de los viñedos. El cultivo de la uva implica prácticas de poda, riego, fertilización y control de plagas. La poda consiste en la eliminación de partes de la vid para el control de su crecimiento, y se realiza entre los meses de junio y agosto.

El riego por su parte se realiza en verano para mantener el suministro continuo de agua en el suelo. Los viñedos son susceptibles a varias enfermedades y ataques de insectos como consecuencia de las características de las uvas, por lo que es importante controlarlos. Agentes químicos y biológicos se utilizan para controlar los ácaros y otros insectos; también se utiliza polvo de azufre para prevenir el crecimiento de moho y otros hongos.

A partir de mediados de enero, y hasta el mes de marzo, las uvas se cosechan cuando se encuentran en su estado óptimo de contenido de azúcar. Los racimos son cortados y seleccionados de forma manual, puestos en cajones, y estos a su vez palletizados para su traslado al secadero, el cual es construido en su totalidad con piedras limpias lo que asegura un secado homogéneo y en caso de lluvias un escurrimiento de forma inmediata. Al llegar al secadero, se procede a colocar los racimos de uva sobre rejillas para su exposición al sol, previo proceso de agrietado*. Esto es lo que se conoce como secado tradicional o directo con el sol. No obstante existen otros equipos que emplean el calor solar para tal fin, estos son los hornos solares, o deshidratadores, y otros que no emplean el calor solar, sino un calor artificial; horno común y horno microondas. Estos procesos y técnicas son descritos y comparados en detalle en el punto 4; “el secado y sus técnicas”.

*Agrietado: tratamiento (con NaOH a 80-90°C) previo a la deshidratación de frutas con la finalidad de eliminar la capa de cera natural propia de los vegetales, facilitando de esta manera la eliminación de humedad durante el secado.



Figura 14. Secado de uva tradicional en secadero de piedras.

Independientemente del método que se utilice para la deshidratación de las uvas es necesario tener las condiciones que aseguren un flujo constante de aire caliente con bajo contenido de humedad y a la temperatura apropiada, no excediendo ciertos valores de temperatura ($T < 50^{\circ}\text{C}$) para no modificar las características nutricionales de la uva pasa. En este sentido, existen tratamientos previos al secado para disminuir o evitar este y otros deterioros de la uva. Entre ellos; el escaldado (mirar en el punto 2.2), acidificado/sulfitado para evitar el pardeamiento y las pérdidas de vitaminas y/o el azucarado/salado.

Dependiendo del clima las uvas se dejan secar de 2 a 3 semanas, tiempo en el que su contenido de humedad pasa de un 89% a un 15%. Siendo estas recolectadas y puestas en bins cuando están en el punto de secado óptimo para su traslado a la planta donde son fumigadas y almacenadas en almacenes a la espera de su procesamiento.

La etapa del post-secado comienza con la fumigación por segunda vez de las pasas con fosfuro de aluminio que en contacto con el aire libera fosfamina, eliminando todo insecto vivo o huevo que pueda quedar en las pasas. Inmediatamente se le realiza el despallado y calibrado, para eliminar todo tipo de palos y hojas, y clasificarlas por tamaño.

Luego se procede al lavado para extraer todo resto de tierra o suciedad, su posterior abrillantado con aceite vegetal, lo que protege la piel de las pasas. Pasando luego por un clasificador el cual detecta y separa todo tipo de objetos extraños; como palos pedicelos y toda pasa que no reúna las características de la especificación del cliente. Posteriormente se realiza una inspección visual por operarios altamente cualificados, donde se comprueba nuevamente la calidad de las pasas, y finalmente se controla por una máquina de rayos X para comprobar nuevamente el producto, esta vez no sólo en su aspecto exterior sino interior, por si hubiera algo extraño.

El último paso del proceso es el pesado y envasado del producto, luego la caja ya cerrada se pasa por un detector de metales; para su palletizado y se almacenado a temperatura y humedad controladas.

Si se atiende a las propiedades de las pasas de uva, durante los procesos de desecación la uva pierde el agua natural que posee, por lo que se concentran los nutrientes, de aquí que las pasas de uva sean una excelente fuente de fibra, proteínas, potasio y vitaminas, al igual que ya ocurría con las uvas aunque en menor proporción.

Las pasas de uva son un alimento ideal para incluir en el desayuno junto a los cereales, son una alternativa muy beneficiosa para personas mayores y un complemento importante en la dieta de los deportistas que realizan esfuerzos físicos intensos, por su aporte extra de azúcar y calorías. Aunque no se aconseja en aquellas personas que tiene digestión lenta, y hay que controlar su uso, ya que por su alto contenido en azúcar, pueden favorecer la aparición de caries, ya que su consistencia pegajosa hace que se adhieran a las piezas dentales.

2.5. Características y aplicaciones de los productos deshidratados

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversas técnicas para la conservación de los alimentos como consecuencia de que estos en su estado natural se descomponen fácilmente debido a diferentes factores como la acción de mohos, levaduras, bacterias y enzimas promovidos por su exposición al aire y a temperaturas elevadas, que aceleran dichos procesos y generan la modificación de su color, aspecto, olor y sabor. La deshidratación es una de estas técnicas.

La deshidratación ha hecho posible disponer de ciertos alimentos en cualquier temporada del año, siendo una de las técnicas más eficaces en su cometido, el de la conservación, por encima de otras técnicas como la congelación, salmuera y salazones, radiación y enlatado. Esto se debe a la inactivación de la carga microbiana existente en el producto, como consecuencia de la ausencia de agua libre disponible para su desarrollo, tal y como se observa en la tabla adjunta, donde se recoge la clasificación de los alimentos en función de su contenido de a_w , así como sus riesgos, tratamientos y envases característicos.

a_w	RIESGO	TIPO DE ALIMENTO		MICROBIOS DE REFERENCIA	TRATAMIENTO TÉRMICO	ENVASE	TRATAMIENTO COMPLEMENTARIO
>0,90	Microbiano Bioquímico Químico	De humedad alta	Poco ácido ($pH > 4,6$)	Bacterias esporógenas	Esterilización >100°C	Hermético	
			Ácido ($3,7 \sim 4,0 \leq pH \leq 4,6$)	Bacterias no esporógenas	Esterilización 100°C		
			Muy ácido ($pH < 3,7 \sim 4,0$)	Levaduras Mohos	Pasteurización	Impermeable	Refrigeración Atmósfera controlada Antioxidantes Conservadores
0,60-0,90	Microbiano Bioquímico Químico	De humedad intermedia		Levaduras Mohos	Pasteurización Llenado en caliente	Impermeable	Refrigeración Atmósfera controlada Antioxidantes
0,35-0,60	Bioquímico Químico	De baja humedad				Impermeable	Atmósfera controlada Antioxidantes
<0,35	Químico	Deshidratado					

En cuanto a sus características, los productos deshidratados:

- Tienen un sabor más intenso que el alimento fresco, conservando sus propiedades nutritivas, sabor, color, consistencia y aspecto casi en su totalidad, durante largos periodos de tiempo.
- Se pueden volver a rehidratar para su consumo.
- Su tamaño es más pequeño y son de menor peso que en su estado natural. Lo que los hacen más fáciles de transportar y almacenar.
- Las alteraciones físicas más habituales son deformación, endurecimiento, cambio de color y en menor medida pérdida de sólidos.
- Gozan de una buena imagen. El consumidor aprecia que estos productos sean naturales, no engorden y puedan ser consumidos a cualquier hora.
- Se pueden encontrar en cualquier temporada, ya que permite conservar cualquier tipo de alimento de forma segura.
- No requieren conservantes.



Figura 15. Imagen de diversos alimentos deshidratados.

Por otro lado, otro elemento que demuestra la evolución de los alimentos deshidratados son sus aplicaciones. Tradicionalmente, los productos deshidratados se limitaban a ciertos postres, si bien hoy en día se pueden encontrar en guisos, ensaladas, panes, así como snacks (botanas), decoración de platos y otras aplicaciones.

A pesar que el proceso de deshidratación no es excesivamente complejo, se debe cuidar que el sabor, olor, apariencia y valor nutritivo del producto una vez rehidratado sea lo más semejante al producto fresco, ya que de lo contrario será rechazado por el consumidor.

4. EL SECADO Y SUS TÉCNICAS (8) (9) (10) (11)

Se entiende por secado de los alimentos a la extracción deliberada del agua que contienen, la cual varía en los productos agrícolas entre el 30% y el 90% de su masa, y es reducido a un porcentaje entre el 8 y el 16%. Las diferencias de este procedimiento con otros tipos de conservación y los objetivos y ventajas de este procedimiento ya han sido considerados en los apartados anteriores, por lo que no se hará nuevamente hincapié en ello, y si en las diferentes técnicas de secado.

Tipos de secado

Existen muchas y diferentes técnicas para efectuar el secado de productos alimenticios, las más conocidas: el secado solar tradicional y secado convencional (mediante equipos industriales). En ambos casos el proceso se basa en entregar una cierta energía al producto para eliminar el agua que contiene. Todas las técnicas de secado deben eliminar el agua del producto. Los factores claves para un buen secado son:

1. Aire caliente a una temperatura de 40 a 70°C
2. Aire con un bajo contenido de humedad.
3. Movimiento constante del aire.

Mientras que el tiempo de secado viene determinado por los siguientes factores:

- Tipo de producto (mayor contenido de agua, mayor tiempo).
- Tamaño de los trozos del producto (mas grande, mayor tiempo).
- Temperatura del aire (más elevada, menor tiempo).
- Humedad relativa del aire (más elevada, mayor tiempo).
- Velocidad del aire (más elevada, menor tiempo).

Por lo general el criterio más importante para definir el fin del secado es el contenido de humedad, el cual suele determinarse a partir de la evolución del peso de la muestra que se está secando.

- *Secado solar tradicional*

El método más sencillo para secar alimentos consiste en la exposición del producto directamente a los rayos solares.

En el secado solar de las uvas, estas se dejan secar al aire libre, al sol y en lugares en donde hay corrientes de aire. Este procedimiento asegura el sabor, la conservación de las propiedades y cualidades originales de las mismas. De esta manera el secado total suele tardar unos 10 días por lo menos, dependiendo del clima y la temperatura. El proceso es lento debido a la elevada humedad en el ambiente.

Sin embargo dicho método presenta inconvenientes: existe demasiada dependencia de las condiciones climáticas, las condiciones higiénicas son precarias, es difícil de programar y se corren riesgos de perder el producto por lluvias, vientos, acción de insectos y roedores.

Si bien es una opción de bajo costo, en la práctica no resulta viable a nivel industrial dados los requerimientos de espacio, posibilidad de contaminación, etc.

Por ello, se han creado métodos o procedimientos que aseguran un buen proceso a través de equipos finamente diseñados conocidos como secadores solares.

Los secadores solares permiten elevar la temperatura del aire de tal manera que el proceso de secado de los productos es acelerado. En cualquier secador solar, es posible definir la temperatura máxima que puede ser alcanzada. El factor determinante es el diseño del secador. De esta manera, un secador puede ser diseñado para temperaturas máximas de 35°C - 40°C, 40°C - 45°C, 50°C - 55°C o más.

La temperatura máxima para la cual un secador es diseñado depende del tipo de producto a deshidratar. Para el deshidratado de productos alimenticios, es recomendable tomar en cuenta la naturaleza de los mismos, respecto a los nutrientes cuyo valor deseamos conservar. Los secadores solares pueden ser clasificados según la forma en la cual captan la radiación solar, en tres tipos básicos:

1. *Los Secadores Solares Directos*, en los cuales los productos a deshidratar absorben directamente la radiación solar y obtienen de esta manera la energía calorífica necesaria para evaporar el agua contenida.

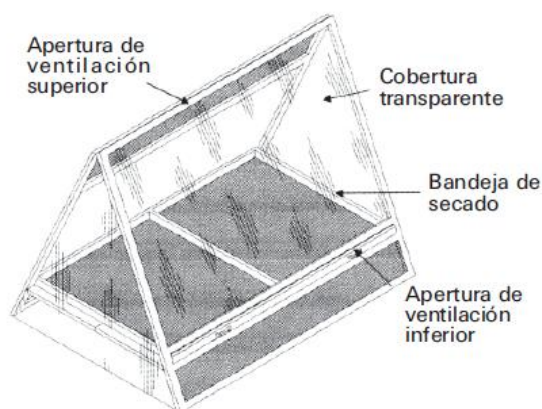


Figura 16. Secador tipo carpa.

El proceso del secado se produce por la acción de aire cálido y seco, que pasa por los productos a secar, ubicados generalmente en bandejas en el interior del secadero. De esta forma la humedad contenida en los alimentos se evapora a la superficie de los mismos y pasa en forma de vapor al aire, que los rodea.

Es un modelo sencillo, compacto, liviano, plegable y transportable para secar cualquier tipo de alimento en pequeñas cantidades. Está hecho de una estructura metálica /madera de la forma de una carpa triangular, cubierta en gran parte por una lamina de plástico transparente, resistente a los rayos ultravioletas y puede tener diferentes tamaños.

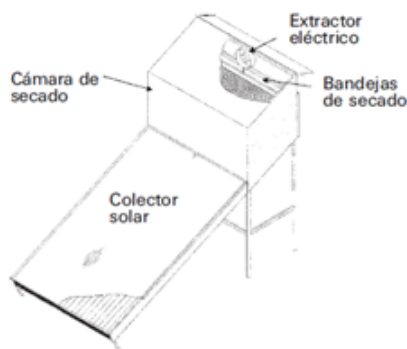


Figura 17. Secador tipo armario.

2. *Los Secadores Solares Indirectos*, en los cuales el aire es calentado en un colector y es conducido a una cámara de secado donde se encuentra el producto.

Los rayos luminosos del Sol son transformados en calor a través del efecto invernadero en un llamado colector solar, que tiene los siguientes elementos:

Una superficie metálica oscura, preferiblemente de color negro, orientada hacia la dirección del Sol, que recibe y absorbe los rayos luminosos. El calor producido de esta manera es transferido al aire, que está en contacto con dicha superficie.

Una cobertura transparente (vidrio o plástico), que deja pasar la radiación luminosa y que evita el escape del aire caliente.

Es un modelo más complejo para secar todo tipo de alimentos, especialmente aquellos que necesitan mantener un buen color y proteger sus propiedades naturales. Consiste en una cámara de secado y un colector solar inclinado, unidos entre sí en la parte inferior de la cámara. En esta se encuentran superpuestas varias bandejas de secado removibles con tejido. Las bandejas están protegidas por una puerta colocada en la pared trasera de la cámara.

El colector está cubierto con vidrio y tiene en su interior una chapa de color negro doblada en zigzag, para aumentar su superficie de intercambio de calor con el aire. El aire ambiental entra por la extremidad inferior del colector, que está cubierta por una malla mosquitero, y se calienta gradualmente hasta una temperatura de 25 a 30°C superior a la temperatura ambiental. Entra finalmente en la cámara, donde atraviesa las bandejas ejerciendo su poder secador. Un extractor eléctrico de aire en la parte superior de la cámara garantiza la buena ventilación del aparato.

3. *Los Secadores Solares Mixtos*, que consisten en una combinación de las dos formas anteriores, utilizando tanto la radiación solar directamente como el aire precalentado en un colector solar.

Este modelo sirve para pequeños emprendimientos industriales. Consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro y una cobertura transparente de polietileno, igual que el tipo carpa. El túnel está dividido en sectores alternantes de colector y secador. Los primeros tienen la función de calentar el aire, que luego en los últimos es utilizado para el secado de los productos en las bandejas.

El aire circula en forma horizontal a través de todo el túnel, ingresa por un extremo y sale por el otro, generalmente con la ayuda de un ventilador eléctrico.

El secadero se calienta a una temperatura de 20 a 25°C superior a la temperatura ambiental. En ocasiones para un mejor aprovechamiento del secadero, se puede agregar un sistema de calefacción auxiliar. Se usa un combustible o energía eléctrica como fuente de energía auxiliar para los periodos con deficiencia de radiación solar, para los días nublados y para seguir trabajando en horas de la noche.

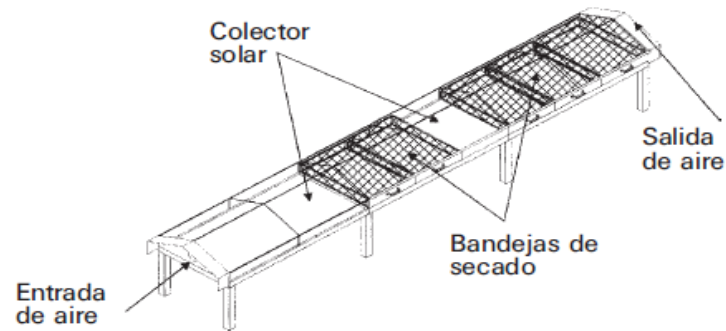


Figura 18. Secador tipo túnel.

- Secado convencional

Este es el método más usado a nivel industrial, y en él, se utilizan diferentes tipos de “hornos” de deshidratado, con alimentación a diesel, electricidad o gas.

El secadero de horno no es más que un edificio de dos plantas con un horno en el piso inferior. El suelo enrejado de la segunda planta permite el paso del aire caliente, mientras que el aire húmedo es eliminado a través de una chimenea. Para llevar a cabo con éxito este método se deberá mover y voltear periódicamente el producto. Este método no es del todo eficiente en cuanto a tiempo y adolece de falta de control sobre el proceso.

Figura 19. Secador de túnel

Por su parte, los secaderos de túnel proporcionan un sistema más sofisticado que permite secar de forma semicontinua grandes volúmenes de producción. El tamaño del túnel puede superar los 20 metros de longitud, siendo el área transversal de aproximadamente 2 x 2 metros. El producto fresco se distribuye en bandejas apiladas en vagonetas, debidamente espaciadas para mayor recepción del aire, siendo el aire impulsado por potentes ventiladores a través de calentadores.



Estos secadores convencionales están diseñados para funcionar a temperatura y flujo de aire regulables, permitiendo la determinación de temperatura y flujo más adecuados para un secado más rápido.

Al calentar aire, que está a la temperatura del ambiente y con un cierto porcentaje de humedad, aumenta su capacidad de absorber vapor de agua. Por cada 20°C de aumento de la temperatura del aire su capacidad de retener vapor de agua se triplica y por consecuencia su humedad relativa se reduce a un tercio.

El flujo de aire caliente (accionado por medio de un ventilador), circula por el producto transversalmente a las bandejas y luego es evacuado. La circulación transversal permite que la superficie del intercambio de vapor sea mayor y con ello también la velocidad de secado.

Este procedimiento lleva alrededor de 7 a 10 horas en hornos que comienzan a una temperatura de 50 grados y se elevan hasta llegar a unos 70 grados, u tan sólo 90 min en el microondas donde también se lleva a cabo una evolución progresiva de la temperatura.

5. CÁLCULOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN (1)

A continuación se describe el estudio numérico empleado para el desarrollo del presente trabajo; analizar cualitativa y teóricamente el comportamiento que sufren las uvas cuando se someten a diferentes técnicas de secado para obtener uvas pasas. Un estudio que a diferencia de la termodinámica que estudia la transferencia de energía térmica entre estados de equilibrio, se encarga del estudio de esa misma transferencia pero entre estados de no equilibrio (en instantes distintos al de la posición de equilibrio inicial y final).

Las leyes físicas que describen su comportamiento son simples y fácilmente comprensibles, pero la descripción analítica es compleja. Se tratará además, de resaltar las diferencias entre los mecanismos básicos que explican los diferentes fenómenos, y cómo afectan las condiciones de contorno a su evolución temporal.

5.1 Desarrollo teórico y metodología

Determinación del Campo de Temperatura

La temperatura es una función que puede ser representada como:

$T = T(r, t)$. Donde: r es el vector de posición, t el tiempo y T la temperatura.

Cuando el campo de temperaturas no depende explícitamente del tiempo y por tanto la transferencia de calor a través de cualquier superficie cerrada es igual a la cantidad de calor generada dentro del volumen limitado por ella, se habla de régimen permanente, para ello es necesario que las condiciones de contorno también sean constantes. Por otro lado si el campo de temperatura es función del tiempo, se hablará de régimen transitorio.

Este concepto es el que se observa en la figura 20, donde se muestra la variación de temperatura frente al tiempo; en rojo se representa la región correspondiente al régimen transitorio, donde $T(r, t)$ y en verde la sección donde $T(r)$ no es función del tiempo.

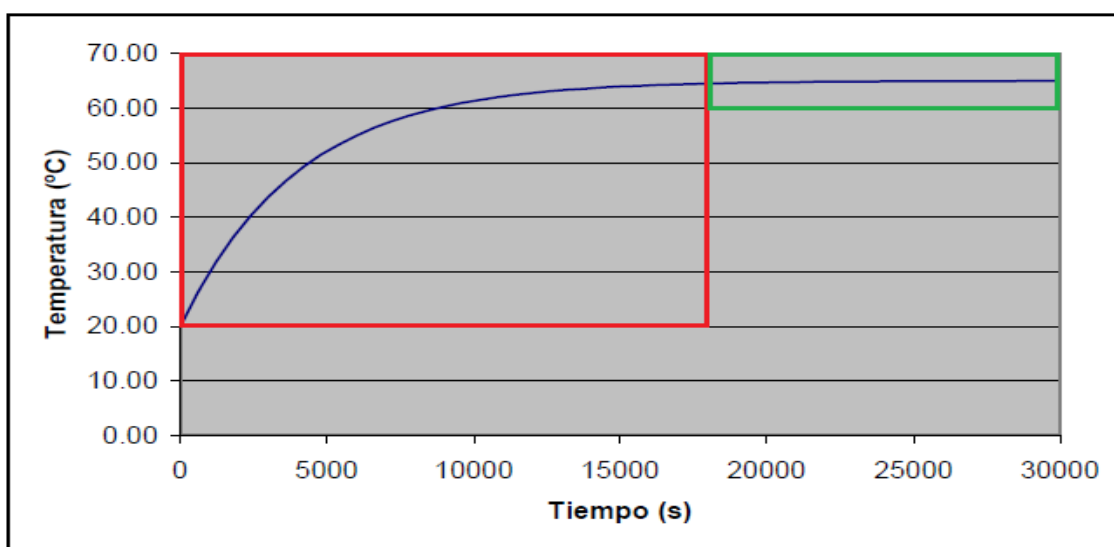


Figura 20. Gráfico de la evolución de la Temperatura con el tiempo.

El gradiente de temperaturas significativo se puede dar en una única dirección, conducción unidimensional* u en varias direcciones, multidimensional.

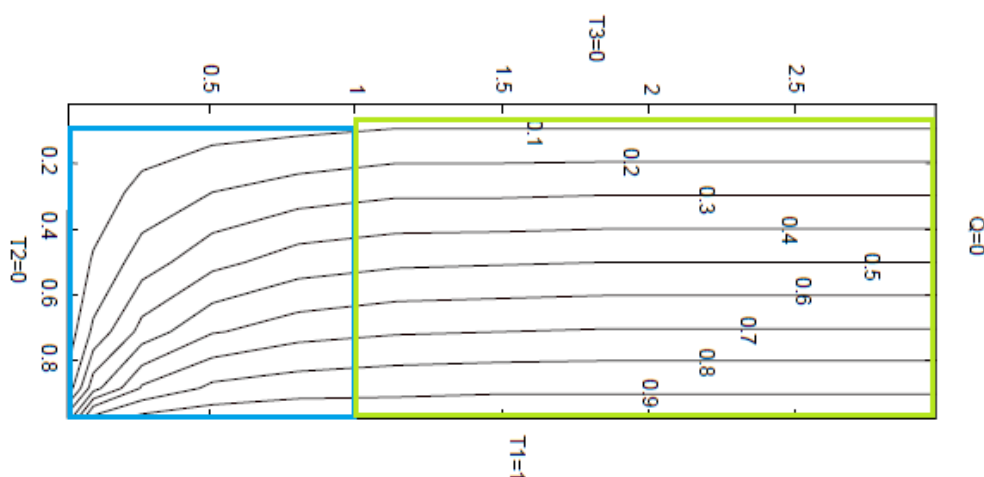


Figura 21. Gráfico conducción unidimensional (en verde) y multidimensional (en azul).

*unidimensional: se refiere al hecho de que solo se necesita una coordenada para describir la variación espacial de las variables dependientes. Así, en un *sistema unidimensional* existen gradientes de temperatura a lo largo de una sola dirección coordinada y la transferencia de calor ocurre exclusivamente en esa dirección.

En el caso del secado de la uva y dado que lo que se quiere obtener es la evolución del campo de temperatura con el tiempo, en esta y demás secciones el desarrollo numérico se realizará considerando exclusivamente la región transitoria y conducción unidimensional (en el caso de una uva) y multidimensional (en el caso de n uvas). De modo que se puede describir lo que ocurre cuando hay una evolución del campo de temperaturas, y del proceso de transferencia de calor, en el tiempo, cuando un cuerpo (la uva) evoluciona hacia un equilibrio térmico (calentamiento en nuestro caso).

Para obtener el campo de Temperaturas nos valdremos de la ecuación general de transferencia de calor, descrita en apartados anteriores:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + G = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

x: posición; k: conductividad térmica ; T: temperatura; G: calor generado; ρ: densidad de la uva; Cp: calor específico de la uva; t: tiempo.

Una ecuación que en el caso de conducción transitoria unidimensional (variables: k, ρ, Cp ctes, h cte, G nula) se simplifica y puede ser descrita para diferentes geometrías como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Placa Plana

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Cilindro

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Esfera

Donde α (difusividad térmica) es un índice característico del material (la uva) que relaciona la conductividad térmica, el calor específico, y su densidad:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

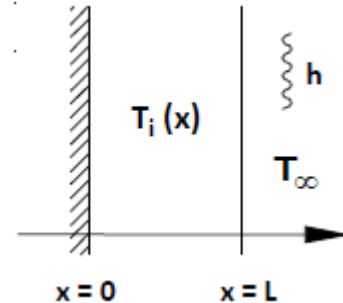
α: difusividad térmica; k: conductividad térmica; ρ: densidad de la uva; Cp: calor específico de la uva.

Para resolver la distribución de temperaturas $T(r, t)$ de las ecuaciones anteriores, es necesario especificar una condición inicial y dos condiciones de frontera.

$$t = 0 \quad T(x, 0) = T_i(x)$$

$$x = 0 \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$x = L \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T - T_\infty)$$



La ecuación presupone:

- Una distribución de temperaturas uniforme en el tiempo $t = 0$.
- Refleja el requerimiento de simetría para el plano medio de la pared/cilindro/esfera. (L , o r en el caso de esfera y cilindro = espesor / 2)
- Describe la condición de superficie experimentada en tiempo $t > 0$.

Es evidente que además de depender de x y t , las temperaturas en la pared también dependen de un número de parámetros físicos. En particular:

$$T(x, t) = f(x, t, T_i, h, k, \alpha, T_\infty, L)$$

x : posición; t : tiempo; T_i : temperatura inicial; h : coeficiente convectivo; k : conductividad térmica; α : difusividad térmica; T_∞ : temperatura del fluido; L : espesor / 2.

Este problema se puede resolver de manera analítica o de forma numérica. No obstante y dada la complejidad de ambos métodos, en el presente trabajo se hace uso de la adimensionalización de las ecuaciones determinantes. Esto se logra reagrupando las variables relevantes en grupos adecuados.

Considerando la variable dependiente T (temperatura). Si la diferencia de temperaturas $\theta = T - T_{\infty}$ se divide entre la diferencia de temperatura máxima posible $\theta_i = T_i - T_{\infty}$, se puede definir una forma adimensional de la variable dependiente como:

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad 0 \leq \theta^* \leq 1.$$

θ^* : temperatura adimensional; T : temperatura en el centro de la uva en un instante " t "; T_{∞} : temperatura del fluido (aire); T_i : temperatura inicial.

Una coordenada espacial se define como:

$$x^* = \frac{x}{L}$$

x^* : posición adimensional; x : posición de la uva en un instante " t "; L : espesor/2

Y un tiempo adimensional se describe como:

$$t^* = \frac{\alpha t}{L^2} = Fo$$

Donde t^* es equivalente al número de Fourier adimensional, que relaciona la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía. Si:

$Fo \gg 1$ Problema en régimen permanente.

$Fo \ll 1$ El sistema permanece en su estado inicial.

Sustituyendo los números adimensionales, la ecuación de transferencia de calor se convierte en:

$$\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo}$$

Y las condiciones iniciales y de frontera son:

$$\theta^*(x^*, 0) = 1$$

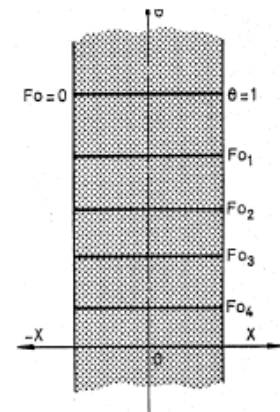
$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^* = 0} = 0$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^* = 1} = -Bi \theta^*(1, t^*)$$

Donde Bi, el número de Biot, es $Bi = h \cdot L / k$, y relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de calor por convección en la superficie de dicho cuerpo. Si:

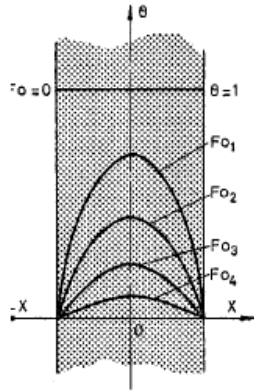
$Bi \ll 1$ El sistema está dominado por las condiciones exteriores (h bajos). La resistencia a la conducción es despreciable. Domina la convección y existen gradientes de temperaturas pequeños en el sólido.

$$Bi \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad X_o = \frac{1}{Bi} \rightarrow \infty$$



La resistencia a la conducción baja, por tanto el sistema de capacidad conduce más y se enfría/calienta más rápidamente. La temperatura no cambia en el sólido con la posición. Las isothermas son paralelas.

$Bi \gg 1$ El sistema está dominado por las condiciones interiores (h altos). Domina la conducción y existen gradientes de temperaturas importantes en el sólido.



$$Bi \rightarrow \infty \Rightarrow X_o = \frac{1}{Bi} \rightarrow 0$$

La temperatura en cualquier punto del sólido es prácticamente la T superficial impuesta.

En forma adimensional la dependencia funcional se expresa ahora como:

$$\theta^* = f(x^*, Fo, Bi)$$

Si se compara esta ecuación con la obtenida anteriormente para T, la considerable ventaja asociada con el cambio de problema a una forma adimensional se hace evidente. Esta ecuación implica que para una geometría establecida, la distribución de temperaturas transitoria es una función universal de x^* , Fo y Bi. Es decir, la solución adimensional supone una forma establecida que no depende del valor particular de T_i , T^∞ , L, k, α o h.

Los números adimensionales Fo y Bi se representan en los gráficos de Heisler (anexos 3 y 4), una representación de la variación de la temperatura adimensional con el tiempo (en $X = 0$; centro de un cuerpo) para diferentes geometrías (p.plana, cilindro y esfera). Lo que nos permite tener rápidos resultados de la temperatura en cualquier punto de un sólido sin efectuar los complejos cálculos que supondría resolver las ecuaciones diferenciales descritas.

Conocido θ^* en el centro de la uva a partir de Bi y Fo y la gráfica de Heisler adecuada a la geometría supuesta (esférica en el caso de la uva), se puede obtener T_c de la siguiente forma:

$$\theta^* = \frac{T_c - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad \longrightarrow \quad T_c = (T_i - T_\infty) \cdot \theta^* + T_\infty$$

θ : temperatura adimensional; T_i : temperatura inicial; T_∞ : temperatura del fluido (aire); T_c : temperatura en el centro de la uva en un instante “t”.

No obstante presenta las siguientes limitaciones:

- No son válidos para $Fo < 0.2$
- Es difícil leerlos con precisión para $Fo < 1$.

La información que necesitamos entonces para resolver el campo de temperatura en una uva son:

- Condiciones geométricas y propiedades físicas: se considera las uvas como un sólido homogéneo e isotrópico, de geometría esférica y propiedades constantes. No existiendo movimientos relativo entre las partes, ni variaciones de volumen.
- Condiciones Iniciales: el campo de temperaturas en el instante inicial.
- Condiciones de Contorno o Frontera: interacción de las uva/s con el entorno (el aire).

El método descrito hasta aquí es aplicable cuando las dimensiones son tales que permiten reducir el problema al caso unidimensional. No obstante cuando ello no es posible la solución debe obtenerse a partir de la consideración multidimensional correspondiente (caso de n uvas). Para lo cual se trata el problema de forma análoga.

En el caso de n uvas estas se suponen extendidas sobre una placa plana de 1 m de longitud, 0.02 m de profundidad y longitud infinita, que inicialmente se encuentran a una T_{inicial} similar al del caso de una uva y expuestas a un flujo de aire constante a diferentes T_{∞} .

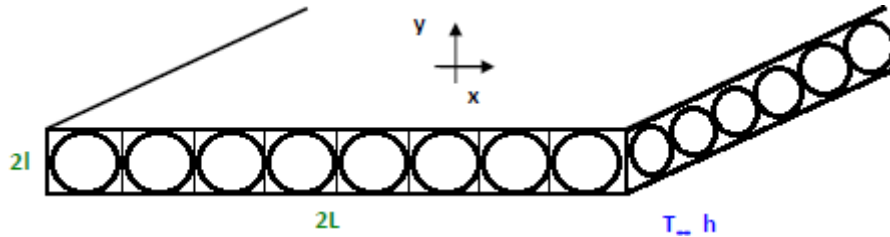


Figura 24. Esquema de la disposición bidimensional de n uvas.

La ecuación diferencial correspondiente será considerando la adimensionalización de la temperatura $\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ y al problema como bidimensional:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Cuyas condiciones de contorno son:

$$\begin{aligned} t = 0 & \quad \theta(x, y, 0) = 1 \\ x = 0 & \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ x = L & \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = h\theta \\ y = 0 & \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \\ y = L & \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L} = h\theta \end{aligned}$$

Una ecuación diferencial que puede ser simplificada si se considera al problema bidimensional como otro problema: el caso de dos placas planas de longitudes L_1 y L_2 .

Estas placas se encuentran inicialmente a una temperatura T_0 y sometidas al flujo del aire de temperatura T_∞ . Es decir estamos ante un problema bidimensional que puede ser simplificado a través del análisis unidimensional conjunto de dos placas planas, considerando las siguientes adimensionalizaciones de las temperaturas T_1 y T_2 para ambas placas:

$$\theta_1 = \frac{T_1 - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \qquad \theta_2 = \frac{T_2 - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$$

Siendo las ecuaciones diferenciales que regirán el problema respectivamente:

$$\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \qquad \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta_2}{\partial t}$$

Con las siguientes condiciones límites:

$$\begin{aligned} t = 0 & \qquad \qquad \qquad \theta_1 \text{ y } \theta_2 = 0 \\ x = L_1 ; y = L_2 & \qquad \qquad -k \nabla \theta_i = \alpha \theta_i ; i = 1, 2 \end{aligned}$$

En el plano medio de las placas por razones de simetría

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \frac{\partial \theta_2}{\partial y} = 0$$

Luego la solución para el campo de temperatura del problema bidimensional para el estudio de n uvas será de la forma:

$$\theta(t, x, z) = \theta_1(t, x) \theta_2(t, y)$$

Determinación del Valor Medio del coeficiente de convección (h)

Inicialmente, en la determinación del campo de temperatura, el valor del coeficiente convectivo de la uva fue tomado como el valor medio de las referencias recogidas en “Ashrae Refrigeration” (12).

No obstante este puede ser calculado experimentalmente a través de la obtención de correlaciones empíricas (anexo 4) obtenidas de la experimentación, para diferentes geometrías. Esto es posible nuevamente gracias a la adimensionalización del problema que nos lleva a definir tres nuevos números adimensionales conocidos como Reynolds (Re), Prandtl (Pr) y Nusselt (Nu).

El número de Reynolds (Re), que caracteriza el movimiento de un fluido.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} = \frac{v_s D}{\nu} \qquad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ρ : densidad del fluido; v_s : velocidad del fluido; D : longitud característica del sistema; μ : viscosidad dinámica del fluido; ν : viscosidad cinemática.

El Prandtl, que es el cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k}$$

ν : viscosidad cinemática; α : difusividad térmica; C_p : capacidad calorífica a $P = \text{cte}$; μ : viscosidad dinámica del fluido; k : conductividad térmica del fluido.

Y el Nusselt, que mide el aumento de la transmisión de calor por convección frente a la misma si fuese solamente por conducción.

$$Nu_L = \frac{hL}{k}$$

h: coeficiente convectivo de transferencia de calor; L: longitud característica del sistema; k: conductividad térmica del fluido.

Definidos los números adimensionales implicados en las correlaciones empíricas (anexo 4), estas pueden ser descritas, para la esfera y placa plana, de forma general de la siguiente manera:

Correlaciones convección forzada, flujo externo, plana plana, flujo paralelo.

$Nu_L = a \cdot Re^b \cdot Pr^c$	Régimen laminar
$Nu_L = (a \cdot Re^b - d) \cdot Pr^c$	Régimen turbulento
$Nu_L = (a \cdot Re^b - d) \cdot Pr^c (\mu/\mu_s)^e$	Régimen turbulento

a, b, c, d y e son constantes que varían en función del régimen característico del fluido, marcado por el nº de Reynolds.

Correlaciones convección forzada, flujo externo, esfera.

$$\overline{Nu_D} = 2 + (0.48 \cdot Re_D^{1/2} + 0.06 \cdot Re_D^{2/3}) \cdot Pr^{0.4} \cdot (\mu/\mu_s)^{1/4}$$

Aunque el valor del coeficiente convectivo medio (h) estará más próximo si se obtiene a partir de las correlaciones supuesto un flujo paralelo en placa plana, ya que la disposición de las uvas en el secado; extendidas sobre una superficie así lo predice, se realizó el mismo cálculo supuesto un flujo externo en esfera para comprobar y comparar el error en que se incurriría (mirar figura 22).

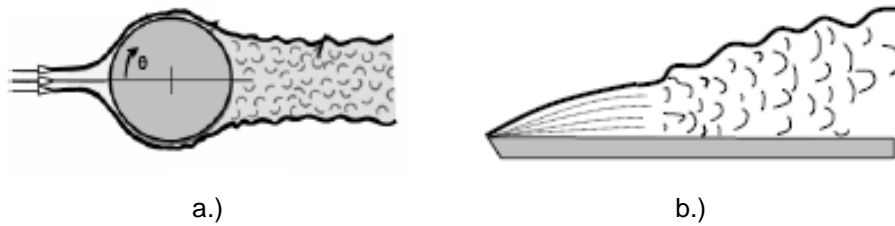


Figura 22. Convección forzada, flujo externo en: a.) esfera b.) placa plana.

El procedimiento que se siguió en ambos casos fue el siguiente:

- Recopilación de los datos de la tabla del anexo 1, correspondientes a las propiedades del aire seco a presión atmosférica
- Caracterización del fluido a través del Reynolds (R . Laminar o Turbulento), y selección de la correlación empírica correspondiente.
- Determinación del Nusselt a partir de las diferentes correlaciones para las distintas temperaturas y el valor del coeficiente convectivo (h) medio a partir de este.

Determinación del coeficiente de transferencia de masa y evolución de la Humedad.

Los métodos de evaporación/secado se basan en determinar la pérdida de líquido de una superficie húmeda midiendo la variación de masa transferida o de otra propiedad vinculada con la pérdida de humedad, como puede ser la transferencia de calor, que ya fue empleada en el apartado anterior para la determinación del campo de temperatura. Durante el secado dos procesos tienen lugar simultáneamente, la transferencia de calor al producto a partir del aire caliente o una fuente de energía y la transferencia de masa de humedad desde el interior del producto a su superficie y desde la superficie hacia el aire circundante.

El proceso de secado de uvas involucra varios parámetros tales como: las propiedades mecánicas, físicas y termo-físicas, así como las condiciones de secado como es la velocidad, temperatura y humedad del aire de secado; el contenido de humedad inicial, final y de equilibrio de la uva; el grado de madurez; su forma y tamaño, entre otras.

El comportamiento de los sólidos en el proceso de secado, se mide como la pérdida de humedad como una función del tiempo. En el proceso de secado se presentan dos períodos: el de velocidad de secado constante y el de velocidad de secado decreciente. En la Figura 23 se muestran los dos períodos de secado: el primer período de velocidad de secado constante, inicia cuando el producto se empieza a secar y finaliza en el momento que el producto alcanza la humedad crítica*; en ese mismo instante empieza el otro período, el de velocidad decreciente, el cual finaliza cuando el producto alcanza la humedad de equilibrio**; es aquí donde el proceso de secado termina.

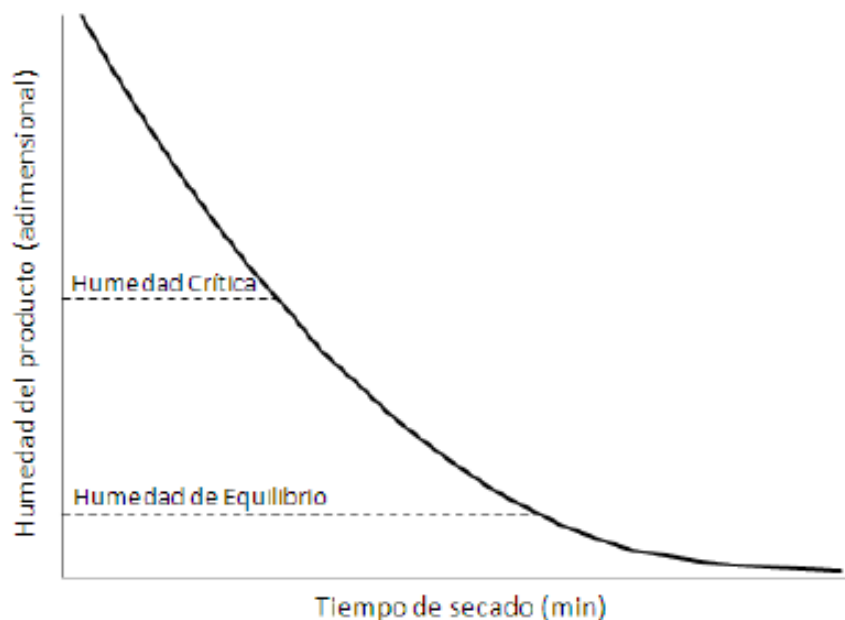


Figura 23. Comportamiento de la humedad en el tiempo.

*Humedad crítica: es la humedad de un producto cuando la resistencia interna al transporte de humedad es igual a la resistencia externa a la remoción de vapor de agua de la superficie.

**Humedad de equilibrio: es el contenido de humedad que alcanza un producto después de haber sido expuesto en un ambiente de humedad relativa y temperatura constante.

El contenido final de humedad, determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso de secado.

El fundamento que se utiliza aquí para poder ejecutar los estudios de la transferencia de calor y transformar los resultados al dominio de la transferencia de masa es la llamada analogía* calor-masa. Una consecuencia de esta analogía es que las relaciones adimensionales que gobiernan el comportamiento de la capa límite térmica deben ser las mismas que las que gobiernan la capa límite de concentración. Por ello los perfiles de temperaturas y concentración de la capa límite debe ser de la misma forma funcional, como se observa en las ecuaciones siguientes:

Transferencia de calor	Masa
$T^* = f(x^*, Re_L, Pr, \frac{dp^*}{dx^*})$	$C_A^* = f(x^*, Re_L, Sc, \frac{dp^*}{dx^*})$
$Nu = \frac{hL}{k} = + \left. \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right _{x^* = 0}$	$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} = + \left. \frac{\partial C_A^*}{\partial x^*} \right _{x^* = 0}$
$Nu = f(x^*, Re_L, Pr)$	$Sh = f(x^*, Re_L, Sc)$
$\overline{Nu} = f(Re_L, Pr)$	$\overline{Sh} = f(Re_L, Sc)$

Se sigue entonces que los gradientes de temperatura y concentración adimensionales evaluados en la superficie, y por tanto, los valores de Nu y Sh, son análogos. En consecuencia, las relaciones de transferencia de calor y masa para una geometría son intercambiables, sólo modificando en las mismas Nusselt (Nu) con Sherwood (Sh) y Prandtl (Pr) con Schmidt (Sc). Siendo los nuevos números adimensionales definidos como:

Sherwood (Sh): cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión.

$$Sh = \frac{h_m L}{D}$$

h_m : coeficiente global de transferencia de masa; L: long. Característica; D: difusividad másica.

*Analogía: dos o más procesos que están gobernados por ecuaciones adimensionales de la misma forma.

Schmidt (Sc): cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, utilizado para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa.

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$$

ν : viscosidad cinemática del fluido; D : la difusividad másica; μ : viscosidad dinámica del fluido; ρ : densidad del fluido; D .

De esta forma se puede obtener el coeficiente convectivo de masa conocido el coeficiente convectivo térmico, para lo cual se procede de la siguiente forma.

De la relación de n^0 adimensionales:

$$\frac{Nu}{Pr^n} = f(x^*, Re_L) = f(x^*, Re_L) = \frac{Sh}{Sc^n}$$

Sustituyendo las definiciones de Nusselt y Sherwood en la ecuación anterior:

$$\frac{hL/k}{Pr^n} = \frac{h_m L/D_{AB}}{Sc^n} \quad \longrightarrow \quad h_m = \frac{h \cdot \alpha^n}{k \cdot D_{AB}^{n-1}}$$

h : coeficiente convectivo de transferencia de calor; L : longitud característica; k : conductividad térmica; Pr : Prandtl; h_m : coeficiente global de transferencia de masa D_{AB} : difusividad másica.

Siendo h_m el coeficiente a determinar y $n = 1/3$.

Por otro lado, y por aplicación de este mismo concepto de la analogía funcional se puede obtener el flujo de masa y la evolución de la humedad frente al tiempo en una uva:

$$\dot{N}_A(x^*) = h_m(C_{A,S} - C_{A,\infty})$$

N_A : flujo de masa; h_m : coeficiente global de transferencia de masa; $C_{A,S}$: concentración de agua en la superficie; $C_{A,\infty}$: concentración de agua en el fluido (aire).

$$\frac{C_A(x^*) - C_{A,S}}{C_{A,\infty} - C_{A,S}} = \frac{T(x^*) - T_s}{T_\infty - T_s} \rightarrow C_A(x^*) = C_{A,S} \cdot \left(1 - \frac{T(x^*) - T_s}{T_\infty - T_s}\right)$$

$C_A(x^*)$: concentración de agua en el centro de la uva; $C_{A,S}$: concentración de agua en la superficie; $C_{A,\infty}$: concentración de agua en el fluido (aire); $T(x^*)$: temperatura en el centro de la uva; T_s : temperatura superficial de la uva; T_∞ : Temperatura del fluido.

$$C_{A,S} = C_{A,sat} = \frac{\rho_{A,sat}}{M_A} = \frac{0.0820 \text{ kg/m}^3}{18 \text{ kg/kmol}} = 0.0046 \text{ kmol/m}^3$$

Con $C_{A,\infty} = 0$: Condición ideal de aire seco.

Y la expresión para la Humedad (X): $\frac{m \text{ H}_2\text{O en el centro de la uva a tiempo } t}{m \text{ H}_2\text{O inicial en el centro}}$

Siendo: $m \text{ H}_2\text{O en el centro de la uva a tiempo } t = \frac{(C_A(x^*) \cdot 18 \text{ kmol/m}^3)}{0.082 \text{ Kg/Kmol}}$

Estos pasos son los que se siguen para los diferentes tiempos obtenidos en el campo de temperatura (anexo 5 y 8), teniendo en cuenta los siguientes datos supuestos:

Masa inicial Uva (kg)	Masa inicial de H ₂ O (Kg)	Masa final de H ₂ O (Kg)	X inicial	X equilibrio
0,006	0,0054	0,000864	0,9	0,16

Los procedimientos descritos hasta este punto, se han aplicado considerando un secado natural/solar de la uva a 25°C (considerando solo convección y convección + radiación), así como para un secado artificial/convencional a diferentes temperaturas (50, 60 y 70°C), con el objetivo de visualizar gráficamente si existe grandes diferencias entre ambos métodos de secado. Tanto en una, como en n uvas.

5.2 Evolución del campo de Temperatura y humedad en el secado de una uva. (1)

A continuación se muestran los datos empleados para la determinación del campo de temperatura en la desecación natural y artificial de una uva, de geometría esférica.

a.) *Solo convección* (Desecación natural y artificial).

Ti (°C)	T _∞ (°C)	k (W/m K)	h (W/m ² K)	α (m ² /s)	D (m)	r (m)	Bi	Bi ⁻¹
10	25	0,567	36,5	1,20E-07	0,016	0,008	0,515	1,942

Ashrae Refrigeration (12)

b.) *Convección + Radiación* (Desecación natural).

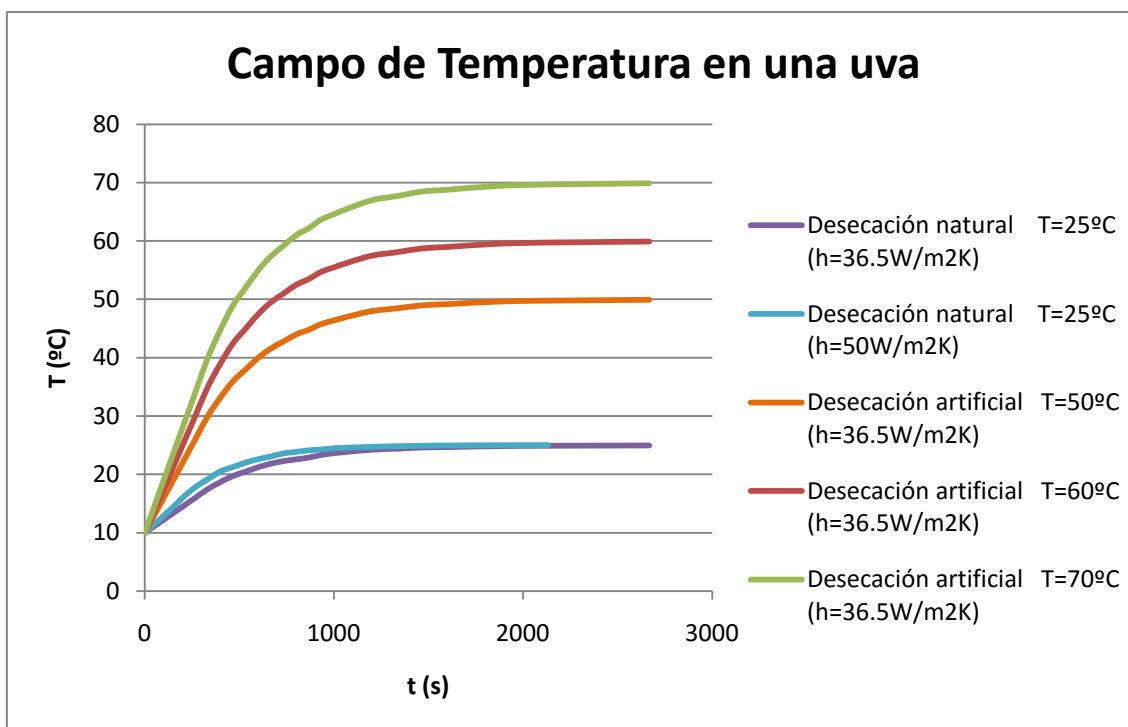
Ti (°C)	T _∞ (°C)	k (W/m K)	h (W/m ² K)	α (m ² /s)	D (m)	r (m)	Bi	Bi ⁻¹
10	25	0,567	50	1,20E-07	0,016	0,008	0,705	1,418

Ashrae Refrigeration (12)

T_i: temperatura inicial; T_∞: temperatura del fluido (aire); k: conductividad térmica; h: coeficiente convectivo; α: difusividad térmica; D: diámetro; r: radio; Bi: N° de Biot.

En el caso b) para la radiación solar, dada la complejidad e incertidumbre de sus valores (13), se ha optado por suponer una aproximación incrementando el coeficiente convectivo (h) hasta un valor de 50 W/m² K, lo que significa que existe un mayor predominio de la conducción en la transferencia de calor y la uva se calentará más rápidamente. Un valor, no contrastado de h, pero que nos dará una visión global de la variación de este término sobre los resultados.

Los datos y cálculos realizados para la obtención de este y el resto de gráficos se encuentran recogidos en los diferentes anexos indicados bajo los gráficos.



Conforme aumenta el coeficiente convectivo, aumenta la transferencia de calor y por tanto la temperatura, siendo necesario un tiempo ligeramente inferior en el caso b ($h = 50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) que en el caso a ($h = 36,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) para alcanzar y pasar de régimen transitorio a permanente en la desecación natural (mirar anexo 5). Así mismo se establece que; la velocidad y por tanto el tiempo necesario para alcanzar la temperatura en el centro de la uva es directamente proporcional a la fuerza impulsora; diferencia de temperatura (ΔT) uva-aire.

Esto quiere decir que si la temperatura máxima tolerable de una uva esta en torno a 50°C (8), esta temperatura se alcanzará en menor tiempo cuanto mayor sea la temperatura del fluido ($70 > 60 > 50$), para una temperatura inicial de la uva similar.

Determinación del Valor Medio del coeficiente de convección (h)

En la tabla siguiente se muestra el valor de h_{medio} teniendo en cuenta como ya se hizo para el campo de temperatura la desecación natural (solo convección y convección + radiación) y la desecación artificial. Así como también se recoge el dato característico U (velocidad de flujo del aire) que nos permite observar una ligera diferencia (de 0.25m/s) entre el uso de las correlaciones de flujo en placa plana o esfera. Una velocidad de flujo de aire, que fue calculada a partir de los coeficientes convectivos impuestos tanto para la desecación natural como para la artificial.

		Desecación Natural		Desecación Artificial		
		Convección	Conv + Rad	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C
Esfera	U(m/s)	1,2	2,21	1,2	1,2	1,2
	h (W/m²*K)	36,716	50,103	36,827	36,382	36,88
Placa Plana	U(m/s)	1,45	2,7	1,45	1,45	1,45
	h (W/m²*K)	36,76	50,162	36,655	36,622	36,461

Anexo 6

En la desecación natural, la diferencia en la velocidad de flujo de aire (U) entre ambas correlaciones son las previsible teóricamente ya que en la suposición de la correlación de la uva como una esfera se considera que el flujo de aire rodea a la uva (en flotación) en todo su perímetro, por tanto, se calienta más rápidamente y requiere menor velocidad (1,2m/s). Mientras que en el caso de la correlación para flujo en placa plana el área de contacto aire-uva se reduce y por tanto la velocidad debe aumentar (de 1,2 a 1,45m/s).

Por otro lado, en el caso de la desecación artificial, el valor del coeficiente convectivo (h) se considera solo con convección ($h = 36,5 \text{ W/m}^2\text{K}$), ya que no existe la influencia solar en las técnicas implicadas, lo que explica que los valores de velocidad U de la tabla adjunta se mantenga constantes (a $T=50/60/70^\circ\text{C}$) para una misma geometría, e iguales a los obtenidos para la desecación natural (solo convección). Siendo nuevamente este mayor para el caso de la geometría de placa plana.

Valor de velocidad de flujo de aire que si atendemos al extraído de la tabla de las que fue considerado el valor medio de h , con un valor de $U = 1,38\text{m/s}$, está más próximo al obtenido de la correlación para la placa plana que el de la esfera. Lo que nos llevará a utilizar este primero en el tratamiento posterior para n uvas.

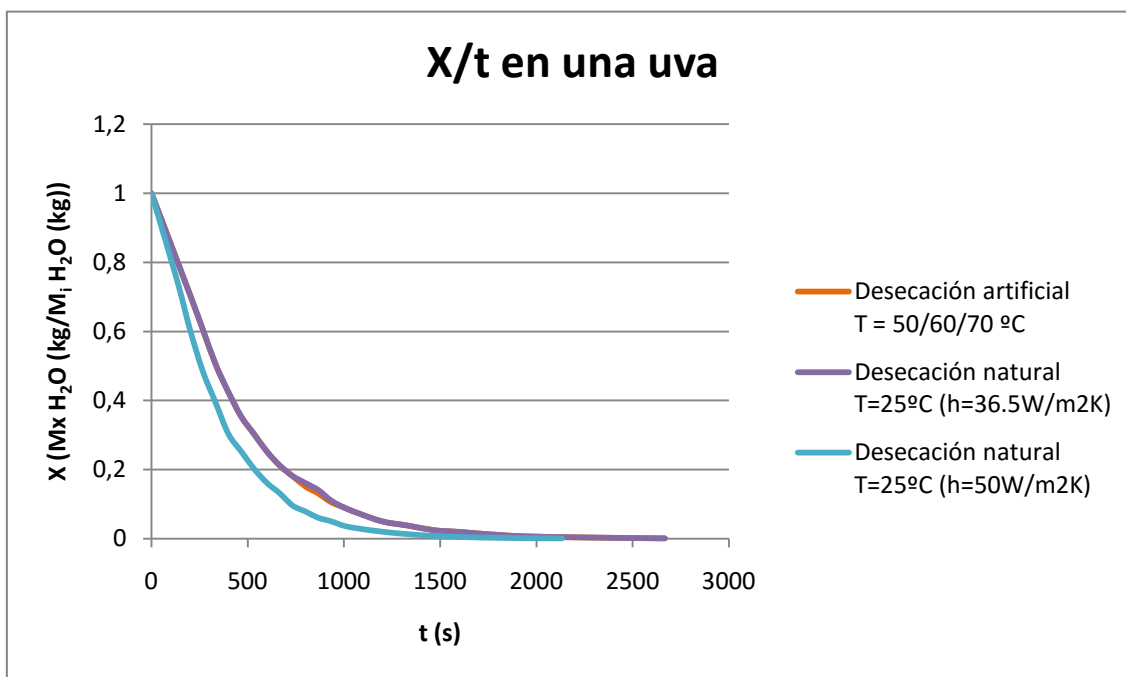
Determinación del coeficiente de transferencia de masa y evolución de la Humedad.

Al igual que ocurría con el coeficiente convectivo cuando se analizaba la transferencia de calor a través del campo de temperatura, cuanto más grandes mayor es la transferencia ya sea esta de calor o masa. N_A varía entre $1,6-2,22\text{E-}04\text{ kmol/m}^2/\text{s}$ para $h = 36,5$ y $50\text{W/m}^2\text{K}$ respectivamente, algo predecible por su comportamiento análogo.

No obstante, el coeficiente de transferencia de masa (h_m) no varía considerablemente ($0,34-0,35\text{ m/s}$) en el caso de la desecación artificial/convencional, esto se debe a que el coeficiente convectivo (h_{medio}) es igual para las tres temperaturas ($h=36,5\text{W/m}^2\text{K}$), y por tanto el flujo de masa (N_A) sigue el mismo comportamiento y es igual ($1,60\text{ kmol/m}^2/\text{s}$) para las 3 temperaturas, ya que de nuevo se cumple el comportamiento análogo.

	<i>Desecación Natural</i>		<i>Desecación Artificial</i>		
	Convección	Conv + Rad	T1	T2	T3
$h_{\text{medio}}(\text{W/m}^2\text{ K})$	36,760	50,162	36,655	36,622	36,461
Bi	0,515	0,705	5,15E-01	5,15E-01	5,15E-01
Bi^{-1}	1,942	1,418	1,942	1,942	1,942
$\alpha (\text{m}^2/\text{s})$	2,01E-05	2,0E-05	2,21E-05	2,28E-05	2,35E-05
$k (\text{W/m K})$	2,48E-02	2,48E-02	2,59E-02	2,63E-02	2,66E-02
$D_{AB} (\text{m}^2/\text{s})$	2,60E-05	2,60E-05	2,60E-05	2,60E-05	2,60E-05
n	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
$h_m (\text{m/s})$	0,035	0,048	0,035	0,035	0,034
$N_A(\text{kmol/m}^2/\text{s})$	1,63E-04	2,22E-04	1,60E-04	1,60E-04	1,58E-04

Se obtiene entonces, el siguiente gráfico de la evolución de la humedad con el tiempo en una uva:



Anexo 7

El gráfico de la evolución de la humedad con el tiempo en una uva muestra lo ya visualizado en el caso del campo de temperatura, una variación pequeña en el coeficiente de transferencia de masa (de 0.035-0.048 m/s) produce una ligera variación en la transferencia de masa que hace que el tiempo necesario para alcanzar la humedad de equilibrio ($X = 0,16$), se reduzca unos 200 segundos aproximadamente en la desecación natural.

Mientras que en el caso de la desecación artificial al haberse obtenido un coeficiente de transferencia de masa ($h_m = 0.035$ m/s), igual para los tres casos ($T = 50/60/70^\circ C$), hace que sólo sea necesario un gráfico para visualizar la evolución de la humedad frente al tiempo, ya que este también es similar en los tres casos. Coincidiendo con la curva obtenida para la desecación natural cuando solo se considera la convección, en ausencia de la radiación, al haberse obtenido ambos casos con un coeficiente convectivo similar ($h = 36,5 W/m^2K$).

Esto nos lleva a predecir y establecer que la desecación es directamente proporcional al coeficiente convectivo y de masa, así como a los valores iniciales de humedad de la uva y el aire, los cuales se han considerado iguales para ambas técnicas de desecación.

5.3 Evolución del campo de Temperatura y humedad en el secado de n uvas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del secado de n uvas cuando se someten a las técnicas ya descritas y mencionadas en el tratamiento de una uva, para aproximar el desarrollo teórico a la realidad y observar si existen diferencias reseñables en los diferentes parámetros calculados. Estando marcado el campo de temperatura y pérdida de humedad en este caso bidimensional por la placa plana de menor espesor (0.02m), ya que la transmisión de calor es inversamente proporcional al espesor.

Desecación natural

Ti (°C)	T _∞ (°C)	k (W/m K)	h (W/m ² K)	α (m ² /s)	L (m)	L/2 (m)	Bi	Bi ⁻¹
10	25	0,57	6,35	1,20E-07	1	0,5	5,60	0,18

Ashrae Refrigeration (12)

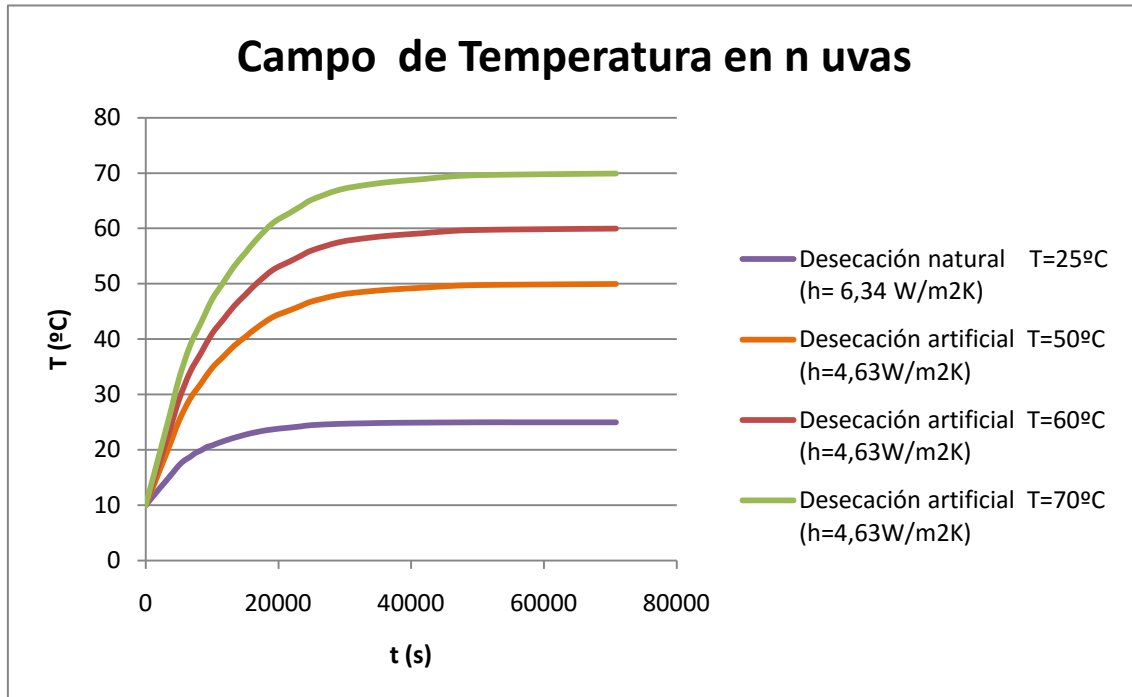
Desecación artificial

Ti (°C)	T _{∞1} (°C)	T _{∞2} (°C)	T _{∞3} (°C)	k (W/m K)	h (W/m ² K)	α (m ² /s)	L (m)	L/2 (m)	Bi	Bi ⁻¹
10	50	60	70	5,67E-01	4,63	1,20E-07	1	0,5	4,08	0,24

Ashrae Refrigeration (12)

El gráfico obtenido para la desecación natural de n uvas es similar a los ya obtenidos cuando se analizó este mismo parámetro para una uva. No obstante el tiempo característico difiere como consecuencia del aumento del espesor de la placa plana sobre la que se extienden las n uvas, de 0.02m (una uva) a 1m (n uvas), y conlleva a su vez la reducción del coeficiente convectivo designado para una uva desde 50 a 6,34 W/m²K.

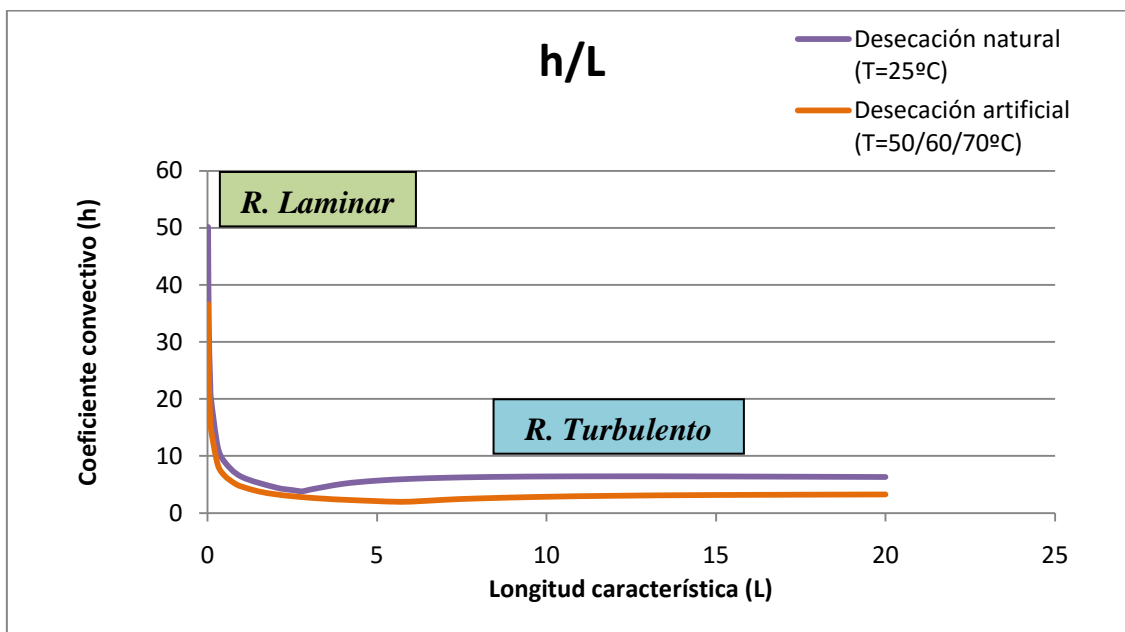
De forma similar ocurre en la desecación artificial, donde manteniendo la velocidad de flujo calculada para esta misma técnica en una uva ($U = 1,45 \text{ m/s}$) el coeficiente convectivo se reduce hasta un valor de $h = 4,63 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Anexo 5 y 8

Este hecho se explica a través de la variación que sufre el número de Reynolds ($Re = \frac{\rho v_s L}{\mu}$) que caracteriza el movimiento del fluido (régimen laminar o turbulento), cuando se modifica el valor de L (longitud característica) desde 0.02 a 1m, manteniendo el resto de parámetros constantes. Lo que conlleva que el número de Nusselt ($Nu = \frac{hL}{k}$) aumente y por tanto el valor del coeficiente convectivo disminuya, ya que de este último se obtiene a partir de las correlaciones empíricas ya descritas en el apartado anterior (anexo 5).

La variación del coeficiente convectivo en función de la longitud característica D se muestra en el siguiente gráfico:



El gráfico adjunto confirma lo obtenido numericamente, el coeficiente convectivo disminuye drásticamente en la región donde predomina un flujo en régimen laminar ($Re < 5 \cdot 10^5$) al aumentar la longitud característica (L), mientras que esta variación es menos notable para grandes L, donde se alcanza elevados números de Reynolds y por tanto régimen turbulento.

Determinación del Valor Medio del coeficiente de convección (h)

El coeficiente convectivo obtenido para n uvas es 8 veces menor que el obtenido para una uva, si se considera la velocidad del aire constante en ambos casos (una y n uvas). Esto se debe nuevamente al aumento de espesor de la placa plana, que hace que el área de contacto entre el fluido (aire) y las uvas sea menor en n uvas que cuando se analiza para una sola aislada. Datos que se recogen en las tablas siguientes:

	<i>Desecación natural</i>	
	n Uvas	una Uva
U(m/s)	2,7	2,7
h (W/m ² ·K)	6,345	50,162

Anexo 6 y 9

	Dsecación artificial					
	n Uvas			una Uva		
	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C
U(m/s)	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
h (W/m²·K)	4,636	4,632	4,612	36,655	36,622	36,461

Anexo 6 y 9

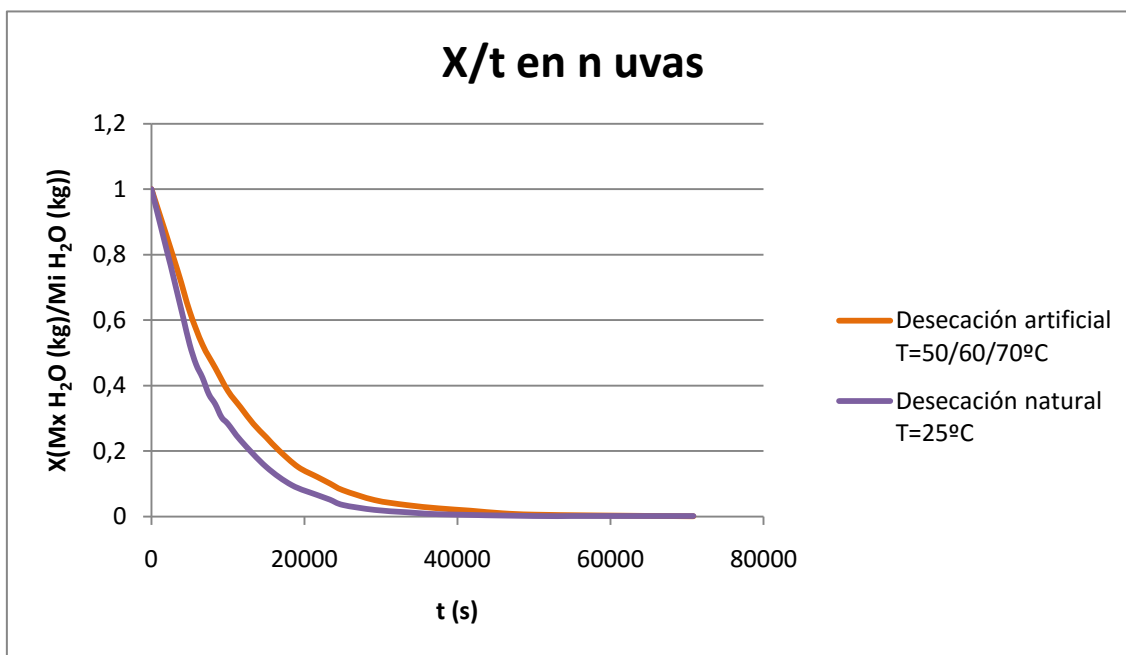
Esto nos lleva a predecir que la pérdida de humedad frente al tiempo será más lenta que para el caso de una uva, así como se observó en el gráfico del campo de temperatura que el aumento de esta, en el centro de la uva, requería un tiempo mayor que en el caso de una uva sola aislada.

Determinación del coeficiente de transferencia de masa y evolución de la Humedad.

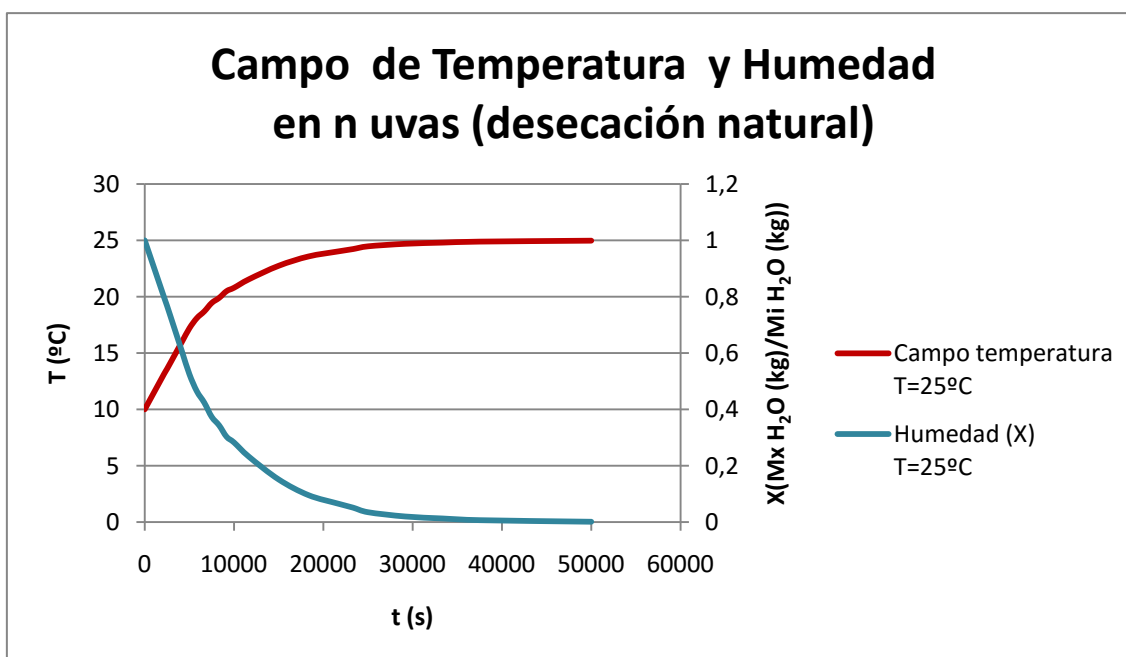
Del mismo modo que ocurre con el coeficiente convectivo determinado en el apartado anterior, el coeficiente de transferencia y flujo de de masa se reduce 8 veces con respecto al obtenido para una uva, al obtenerse este último (h_m) a partir del primero (h_{medio}).

	Dsecación Natural		Dsecación Artificial					
	n Uvas	una Uva	n Uvas			una Uva		
	C + R	C + R	T1	T2	T3	T1	T2	T3
L (m)	1	0,02	1	1	1	0,02	0,02	0,02
h_{medio} (W/m² K)	6,345	50,162	4,636	4,632	4,612	36,655	36,622	36,461
Bi	5,595	0,705	4,083	4,083	4,083	5,15 E-01	5,15 E-01	5,15 E-01
Bi^{-1}	0,179	1,418	0,245	0,245	0,245	1,942	1,942	1,942
α (m²/s)	2,01 E-05	2,00 E-05	2,21 E-05	2,28 E-05	2,35 E-05	2,21 E-05	2,28 E-05	2,35 E-05
k (W/m K)	2,48 E-02	2,48 E-02	2,59 E-02	2,59 E-02	2,66 E-02	2,59 E-02	2,63 E-02	2,66 E-02
D_{AB} (m²/s)	2,60 E-05	2,60 E-05	2,60 E-05	2,60E-05	2,60 E-05	2,60 E-05	2,60 E-05	2,60 E-05
n	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
h_m (m/s)	0,006	0,048	0,004	0,004	0,004	0,035	0,035	0,034
N_A (kmol/m²/s)	2,81 E-05	2,22 E-04	2,03 E-05	2,02 E-05	2,01 E-05	1,60 E-04	1,60 E-04	1,58 E-04

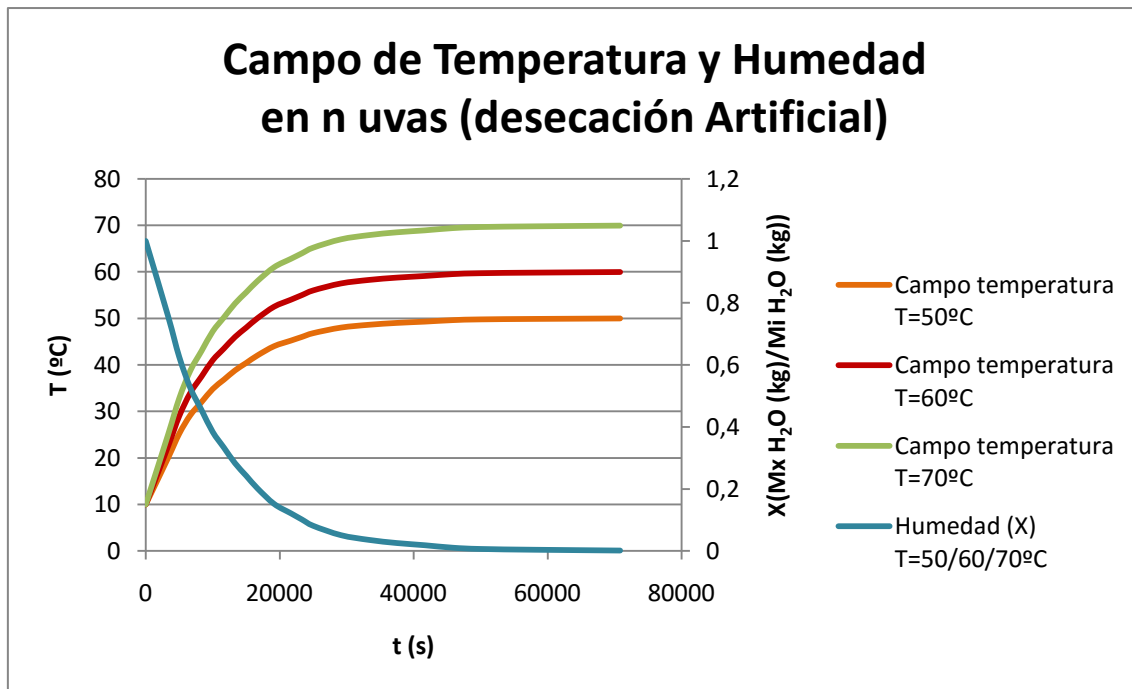
A partir de los datos anteriores se obtiene la evolución de la humedad para n uvas y la representación conjunto de campo de temperatura y humedad en n uvas tanto para la desecación natural como para la artificial/convencional.



Anexo 7 y 10



Anexo 8 y 10



Anexo 8 y 10

Tal y como ocurre con el gráfico del campo de temperatura el aumento del tiempo con respecto al observado en una uva es considerable (de 3000-70000s). Observándose que en la representación conjunta del campo de temperatura y humedad en un mismo gráfico tanto para la desecación natural como para la artificial, se alcanza el régimen permanente al mismo tiempo para ambos parámetros, como consecuencia de la adimensionalización de ambos.

5.4. Evaluación y comparativa de diversos modelo teórico. (1), (13), (14) (15), (16).

Existen diversos modelos teóricos de secado como son: el modelo de secado a baja temperatura, el modelo de secado logarítmico y el modelo de secado de capa delgada, entre otros. En el presente trabajo solo se mencionará el modelo de secado de capa delgada, debido a que es el modelo más estudiado y usado.

La cinética de secado de los alimentos es un fenómeno complejo y requiere representaciones simples para predecir el comportamiento de secado, y optimizar sus parámetros.

Los modelos de capa delgada contribuyen a la comprensión de las características de secado de los materiales agrícolas. Estos modelos están divididos en tres categorías: teórico, semi-teórico y empíricos. Los modelos teóricos se refieren a la solución de la ecuación de difusión o a las ecuaciones simultáneas de transferencia de masa y energía. Los modelos semi-teóricos son generalmente obtenidos por la simplificación general de las series de solución de la segunda ley de Fick. Los modelos empíricos se obtienen de una relación directa entre el contenido de humedad y el tiempo de secado; se aplican fácilmente a la simulación del proceso de secado porque dependen de los datos experimentales.

Entre estos modelos, los acercamientos teóricos consideran solamente la resistencia interna a la transferencia de la humedad, mientras que las aproximaciones semi-teóricas y empíricas consideran solamente la resistencia externa a la transferencia de la humedad entre el producto y el aire.

El secado de capa delgada, es el proceso de remoción de agua de un medio poroso por evaporación, en la que un flujo de aire de secado pasa a través de una capa delgada de producto hasta que el contenido de humedad de equilibrio se alcanza. La remoción de la humedad de productos agrícolas depende de la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire de secado, contenido de humedad inicial, variedad y madurez del producto a secar.

La situación es más sencilla cuando la resistencia de secado (proceso isotérmico) sólo se encuentra en la superficie del producto, para lo cual la pérdida de humedad con el tiempo sigue aproximadamente una ley exponencial.

En la Figura 25 se muestra el modelo de secado de capa delgada, el cual se representa como un volumen de control*, donde se consideran los cambios de humedad que ocurren en el producto, así como los cambios de humedad y temperatura que ocurren en el aire. El aire que pasa a través del producto presenta cambios en la temperatura y humedad relativa al salir de la capa delgada del producto.

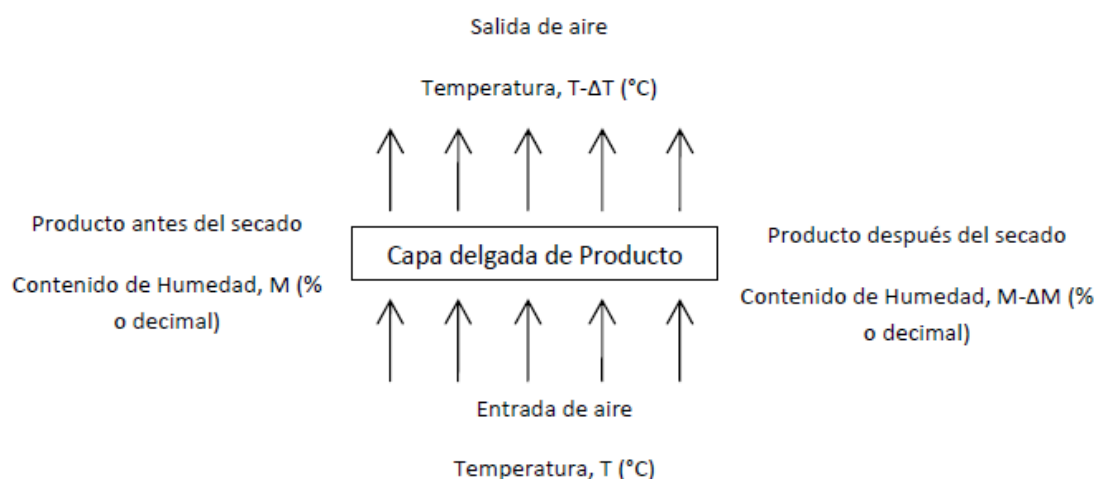


Figura 25. Modelo de secado de capa delgada.

La cinética de secado de todas las frutas y verduras no se puede describir por el mismo modelo de secado debido a la diferencia en contenido de agua y fenómenos típicos del transporte durante el secado.

Los modelos de secado de capa delgada han ganado amplia aceptación para el diseño de secadores y simulación del proceso de secado. Muchas investigaciones han utilizado el modelo exponencial de secado, que describe el comportamiento de secado de los productos agrícolas. La solución de la ecuación de Fick basándose en las consideraciones de resistencia interna de migración de humedad hacia la superficie y encogimiento del producto insignificante, migración de humedad de la superficie del producto al aire en forma de vapor o agua, coeficiente de difusión y temperatura constante.

*Volumen de control: espacio arbitrario que se instituye con el objeto de estudio.

En la tabla adjunta se muestra un resumen de los modelos de secado de capa delgada utilizados para describir la cinética de secado, de los productos agrícolas entre ellos las frutas y verduras.

Modelo	Ecuación
<i>Henderson y Pabis</i>	$MR = a \exp(-kt)$
<i>Page</i>	$MR = \exp(-kt^n)$
<i>Logarítmico</i>	$MR = a \exp(-kt) + c$
<i>2 Términos</i>	$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t)$

Siendo MR:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \longrightarrow M_t = MR \cdot (M_i - M_e) + M_e$$

MR: humedad del producto; M_t : contenido de humedad al tiempo t ; M_e : contenido de humedad de equilibrio; M_i : contenido de humedad inicial, t : tiempo k : constante empírica de secado, a y k son constantes empíricas de secado.

Y los valores impuestos:

Masa inicial Uva (kg)	Masa inicial de H ₂ O (Kg)	Masa final de H ₂ O (Kg)	M_i	M_e
0,006	0,0054	0,000864	0,9	0,16

La comparativa de la curva de humedad obtenida para la desecación artificial de n uvas con algunas de estos modelos se muestra en las siguientes representaciones:

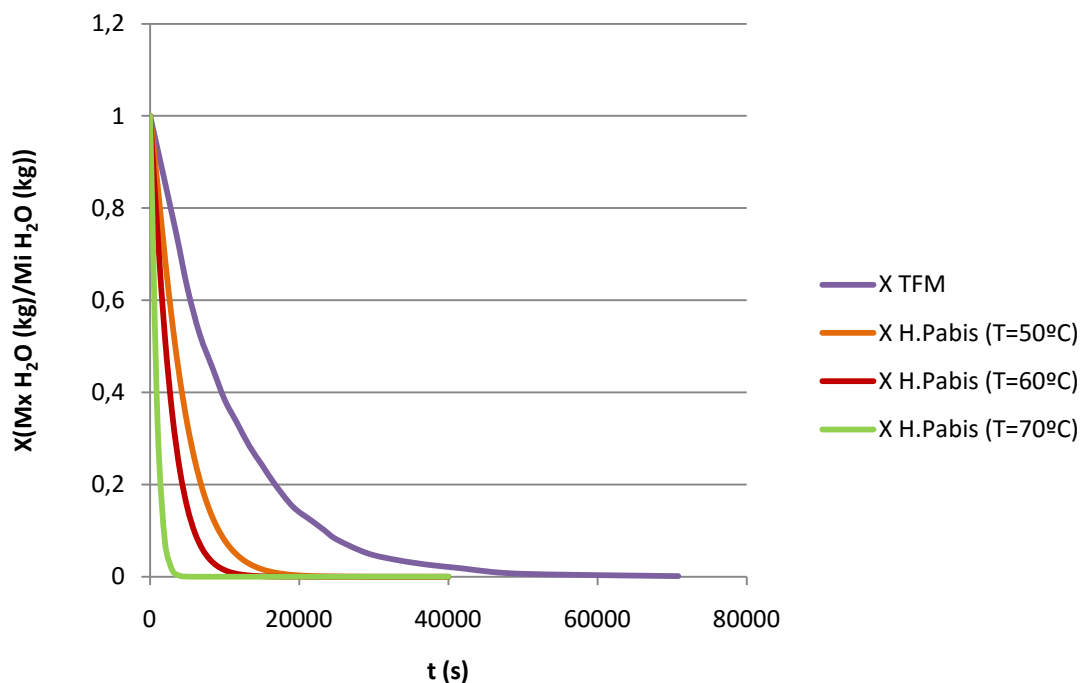
Modelo de secado	Henderson y Pabis $MR = a \exp(-kt)$	
$T = 50^{\circ}\text{C}$	a	1,0334
	k	0,0002
$T = 60^{\circ}\text{C}$	a	1,0109
	k	0,0004
$T = 70^{\circ}\text{C}$	a	1,0609
	k	0,0013

Modelo de secado	Page $MR = \exp(-kt^n)$	
$T = 50^{\circ}\text{C}$	k	0,000042
	n	1,1953
$T = 60^{\circ}\text{C}$	k	0,0001
	n	1,1569
$T = 70^{\circ}\text{C}$	k	0,0002
	n	1,2469

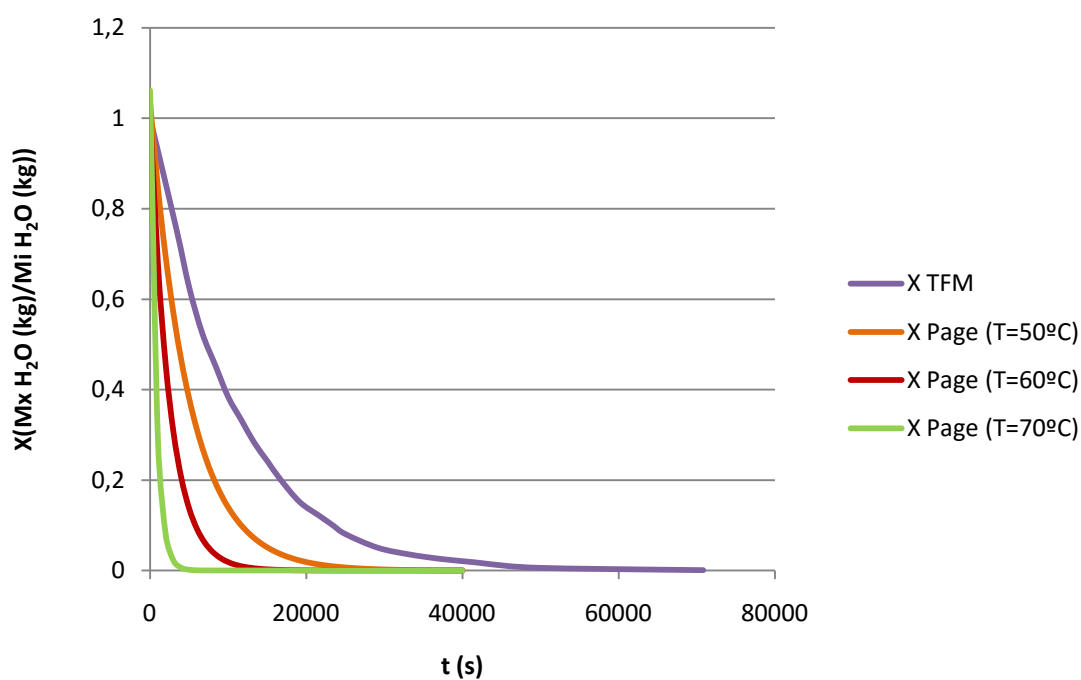
Modelo de secado	Logarítmico $MR = a \exp(-kt) + c$	
$T = 50^{\circ}\text{C}$	a	1,3579
	k	0,0001
	c	-0,3604
$T = 60^{\circ}\text{C}$	a	1,3594
	k	0,0002
	c	-0,3841
$T = 70^{\circ}\text{C}$	a	1,1922
	k	0,0009
	c	-0,1721

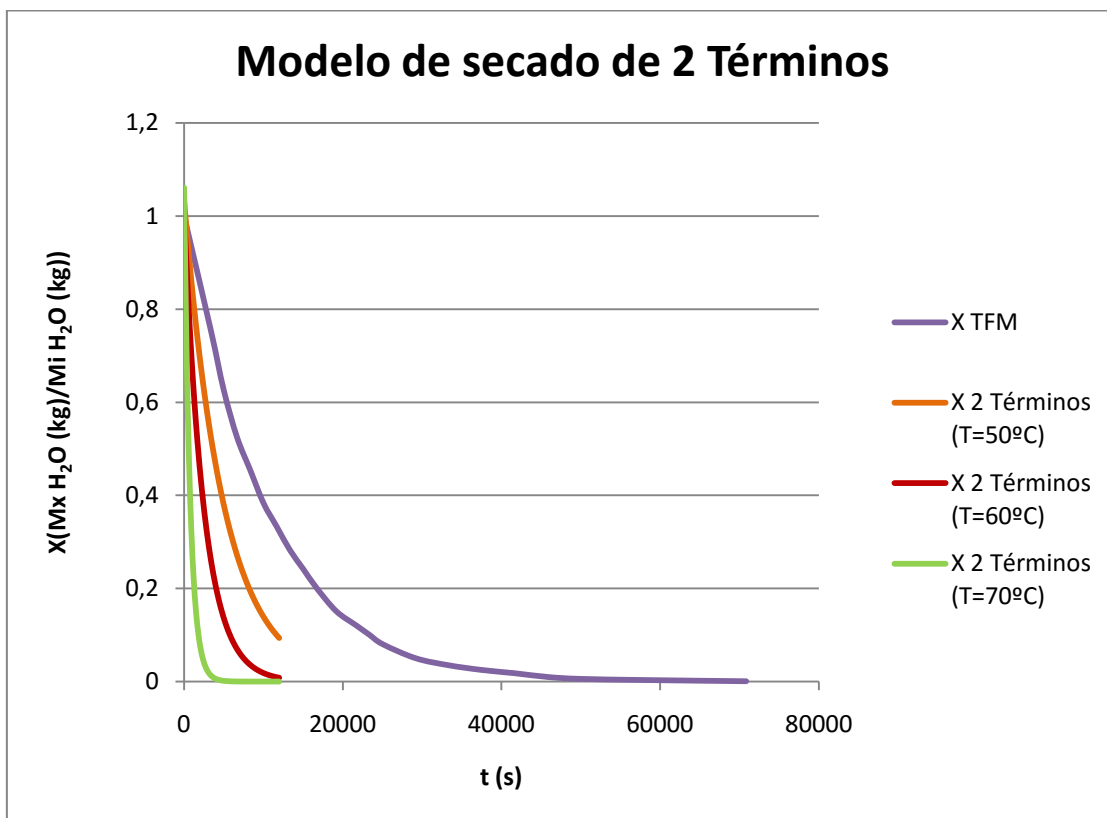
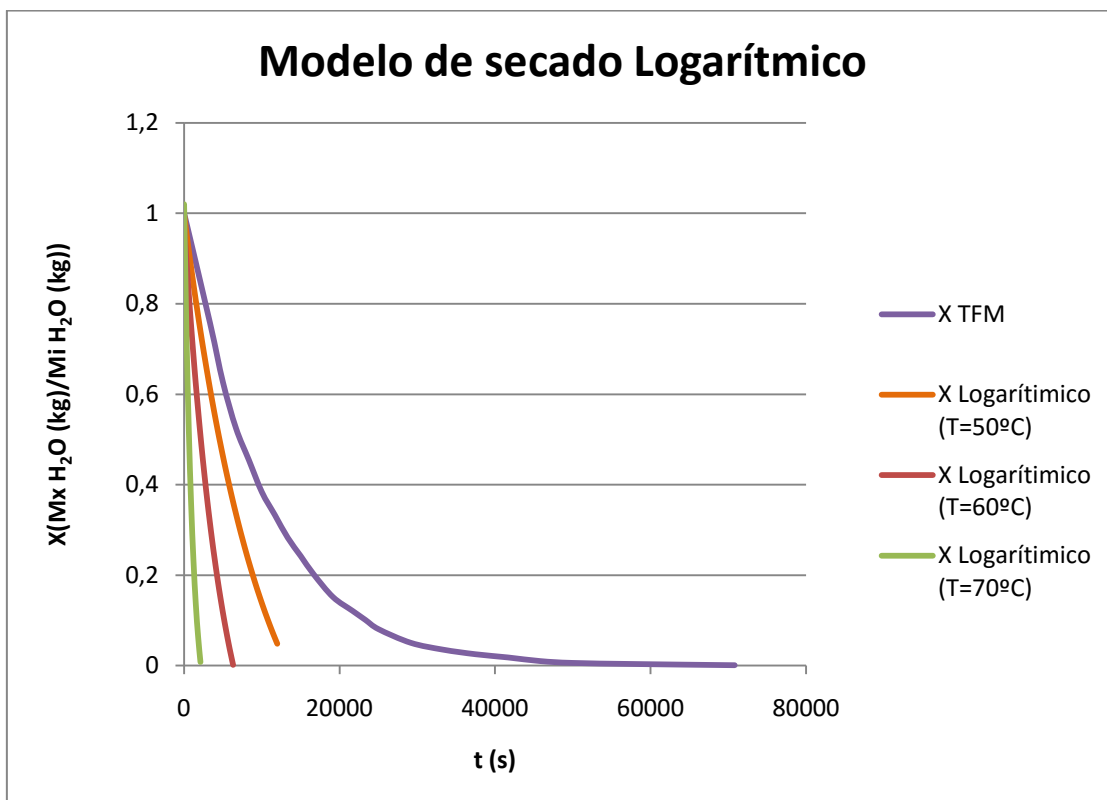
Modelo de secado	2 Términos $MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t)$	
$T = 50^{\circ}\text{C}$	a ₁	0,5171
	k ₁	0,0002
	a ₂	0,5163
	k ₂	0,0002
$T = 60^{\circ}\text{C}$	a ₁	0,5064
	k ₁	0,0004
	a ₂	0,5046
	k ₂	0,0004
$T = 70^{\circ}\text{C}$	a ₁	0,5474
	k ₁	0,0013
	a ₂	0,5135
	k ₂	0,0013

Modelo de secado de Henderson y Pabis



Modelo de secado de Page





A la vista de los resultados obtenidos en las diferentes representaciones, se establece que los modelos de secado usados en las representaciones anteriores son bastante dispares en cuanto a tiempo característico (t) se refiere con respecto al tiempo de secado obtenido en este mismo trabajo para n uvas. No obstante si que son semejantes gráficamente, ya que la pérdida de humedad en todos ellos viene descrita por una curva exponencial decreciente. Siendo algunos de los posibles motivos de las diferencias encontradas con respecto al resultado obtenido en el presente trabajo;

- La velocidad, humedad y flujo de aire. Los modelos teóricos consideran un flujo de aire vertical al alimento en el secado, frente al horizontal supuesto en este trabajo (mirar figura 26). Así como una humedad diferente a la ideal (0%).

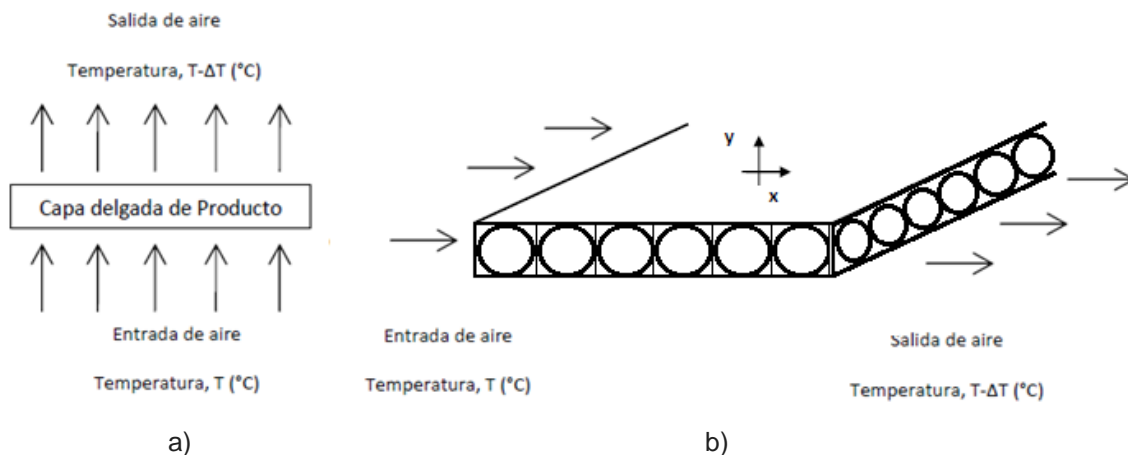


Figura 26. Flujo de aire: a) vertical; b) horizontal.

- Características propias de la experimentación consideradas en los modelos teóricos y no en el desarrollo y metodología (adimensionalización del problema) que se emplea en este trabajo.

- La longitud característica (L) empleada en los diferentes modelos y que como ya se analizó afecta de forma considerable al coeficiente convectivo (h), y por tanto a la transmisión de calor y tiempo de secado.

Por otro lado, y en esto coinciden todos los gráficos, a diferencia de los modelos experimentales expuestos donde el tiempo de secado disminuye conforme aumenta la temperatura del proceso, la adimensionalización del problema en nuestro caso no establece diferencia alguna para las tres temperaturas de secado impuestas ($T = 50/60/70^{\circ}\text{C}$) obteniéndose una única curva de secado para las tres variantes. Esto es consecuencia de que como se obtuvo en el campo de temperatura para la desecación artificial, el tiempo necesario para alcanzar temperaturas de 50, 60 y 70°C en el centro de la uva es similar, ya que el aumento de temperatura es proporcional a la diferencia de temperatura entre la uva y el fluido y no a la temperatura del fluido (T_{∞}).

6. CONCLUSIONES

El estudio llevado a cabo ha puesto de manifiesto que se puede describir lo que ocurre cuando hay una evolución del campo de temperaturas, y del proceso de transferencia de calor, en el tiempo, cuando un cuerpo (la uva) evoluciona hacia un equilibrio térmico (calentamiento en nuestro caso). Tanto en una uva aislada (problema unidimensional) como en n uvas (problema multidimensional).

La variación supuesta en el coeficiente convectivo cuando se consideró la desecación natural a 25°C solo con convección y convección + radiación llevó a establecer que conforme aumenta el coeficiente convectivo, aumenta la transferencia de calor y por tanto la temperatura, siendo necesario un tiempo ligeramente inferior (200s en nuestro caso) para alcanzar y pasar de régimen transitorio a permanente. Una diferencia de tiempo que podría haber sido aun mayor si en lugar de un coeficiente convectivo de 50 W/m²·K, se supone uno de 100 W/m²·K por ejemplo. Así mismo se establece que; la velocidad y por tanto el tiempo necesario para alcanzar la temperatura en el centro de la uva es directamente proporcional a la fuerza impulsora (ΔT uva-aire), y no depende de la temperatura del fluido ($T = 50/60/70^\circ\text{C}$).

Por otro lado la pérdida superficial de húmeda, medida a través de la variación de masa transferida (analogía calor-masa) entre la uva y el aire, determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso. Al igual que ocurría con el coeficiente convectivo cuando se analizaba la transferencia de calor a través del campo de temperatura, cuanto más grande es este, mayor es la transferencia masa (N_A) y pérdida de humedad medida a partir de la pérdida de masa de agua (X), hecho predecible por su comportamiento análogo.

Esto nos lleva a predecir y establecer que la desecación es directamente proporcional al coeficiente convectivo (h) y de masa (h_m), así como a los valores iniciales de humedad de la uva (90%) y el aire (0%), los cuales se han considerado iguales para ambas técnicas de desecación. Siendo los gráficos obtenidos para la desecación de n uvas similares a los obtenidos para una uva, aunque con un tiempo característico diferente como consecuencia del aumento del espesor de la placa plana sobre la que se extienden las n uvas, lo que hace que los coeficientes convectivo de calor y masa se reduzcan en 8 veces (6,34 y 4,63W/m²K) con respecto a los coeficientes iniciales supuestos de 50 y 36,5W/m²K para la desecación natural y artificial respectivamente.

Observándose en la representación conjunta del campo de temperatura y humedad en un mismo gráfico tanto para la desecación natural como para la artificial, una evolución de ambos parámetros con respecto al tiempo similar, y por tanto que se alcanza el régimen permanente al mismo tiempo, como consecuencia de la adimensionalización en ambos casos (mirar gráficos pág. 66 y 67).

Existen diversos modelos teóricos de secado que contribuyen a la comprensión de las características de secado de los materiales agrícolas, y aunque los tiempos característicos obtenidos en estos difieren del obtenido en el presente trabajo para la desecación artificial/convencional de n uvas, si que comparten la característica común de describir la pérdida de humedad a través de una curva exponencial. Siendo algunos de los posibles motivos de las diferencias encontradas con respecto al resultado obtenido en el presente trabajo:

- La velocidad, humedad y flujo de aire. Los modelos teóricos consideran un flujo de aire vertical al alimento en el secado, frente al horizontal supuesto en este trabajo (mirar figura 26). Así como una humedad diferente a la ideal (0%).

- Características propias de la experimentación consideradas en los modelos teóricos y no en el desarrollo y metodología (adimensionalización del problema) que se emplea en este trabajo.
- La longitud característica (L) empleada en los diferentes modelos y que como ya se analizó afecta de forma considerable al coeficiente convectivo (h), y por tanto a la transmisión de calor y tiempo de secado.

Se puede obtener una mejor aproximación a la curva de secado obtenida a través de los modelos teóricos; ajustando la longitud característica del problema (1m en nuestro caso) para conseguir mayores valores de coeficiente convectivos (mirar gráfico de la variación de L frente a h en pág. 64) y por tanto mayor transferencia de calor y menor tiempo de secado. Así como también se puede optar por cambiar la disposición del flujo del aire sobre el alimento, en lugar de vertical, horizontal, y/o llevar a la experimentación el problema propuesto.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. David P. De Witt, Frank P. Incropera. *Fundamentos de transferencia de calor* (capítulos 1-6). Prentice Hall, 1999.
2. J. A. G. Rees, J. Bettison, Pedro Ducar Maluenda. *Procesado térmico y envasado de alimentos*. Acribia, 1994.
3. P, Richardson. *Tecnologías térmicas para el procesado de los alimentos*. Acribia, 2004.
4. Tucker, Gary S. *Food biodeterioration and preservation*. Blackwell, 2008.
5. Brennan, James G. *Manual del procesado de alimentos*. Acribia, 2008.
6. Sun, Lijun Wang and Da-Wen. *Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry*. *Food Science & Technology* 14 (408–423). 2003.
7. Committee, Codex Alimentarius. *Norma del codex para las uvas pasas*, Codex Stan 67. 1981.
8. M. Almada, M.S. Cáceres, M.M Singer. J.C Pulfer. *Guía de uso de secaderos solares para frutas. legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Fundación Celestina Pérez de Almada, 2005.
9. Matthew G. Green, Dishna Schwarz. *Solar Drying Technology*. Infogate. 2001.
10. S. VijayaVenkataRamana, S. Iniyamb,*, Ranko Goicc. *A review of solar drying technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2652–2670). 2012.

-
- 11.** T. Vázquez, S.A. Camacho, M Fernandez, J.D. Fernández, T. Rebhole, M.Guzmán, R. Volgger, J. Camacho. *Manual del secado solar técnico de alimentos. Energética*, 1997.
- 12.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. *ASHRAE Handbook (capítulo 19; Thermal Properties of Foods)*. 2016.
- 13.** Inés N. Ramos, Teresa R.S. Brandao, Cristina L.M. Silva. *Simulation of solar drying of grapes using an integrated heat and mass. Renewable Energy* 81 (897). 2015.
- 14.** G. Adiletta, P. Russo, W. Senadeera, M. Di Matteo. *Drying characteristics and quality of grape . Journal of Food Engineering xxx*. 2015.
- 15.** W. P. da Silva, P. L. do Nascimento, C. M. D. P. da Silva e Silva, J. P. Gomes, I. Hamawand. *Description of Seedless Grape Drying and Determination of Drying Rate. Journal of Agricultural Studies*. 2014, Vol. 2, 2.
- 16.** Ayala, Felipe Díaz. *Estudio del Proceso de Secado de Nopal en una Columna de Charolas*. 2009.

8. ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del aire seco a presión atmosférica.

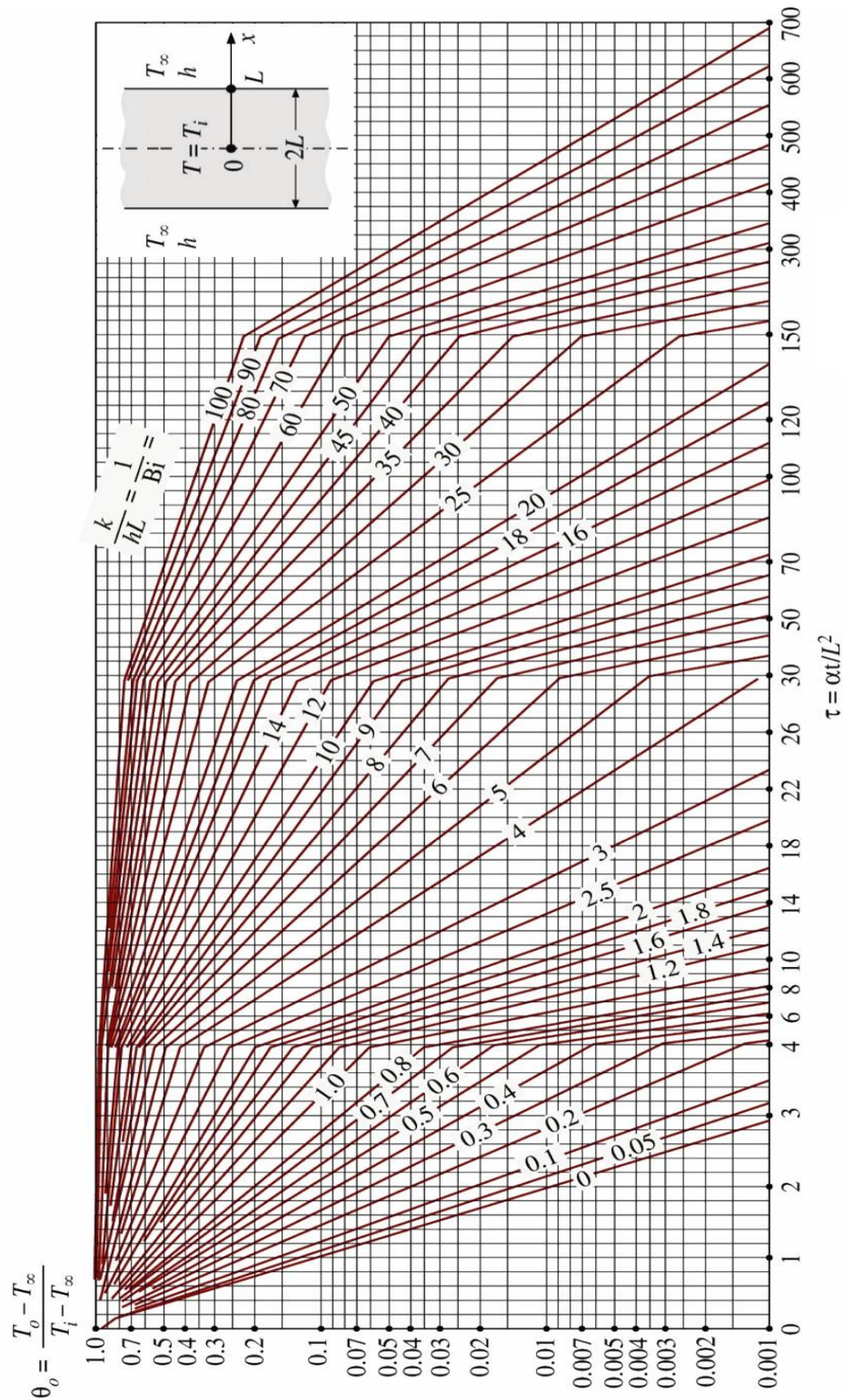
T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.80	0.7350
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.40	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.110	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.060	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.30	19.45	28.45	27.05	0.7190
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.999	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.986	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.972	1.008	21.39	22.00	30.24	30.85	0.7132
95	0.959	1.009	21.60	22.52	30.60	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111

Fuente: Todas las propiedades de Keenan, Chao, Keyes, "Gas Tables", Wiley, 1985.

Excepto:

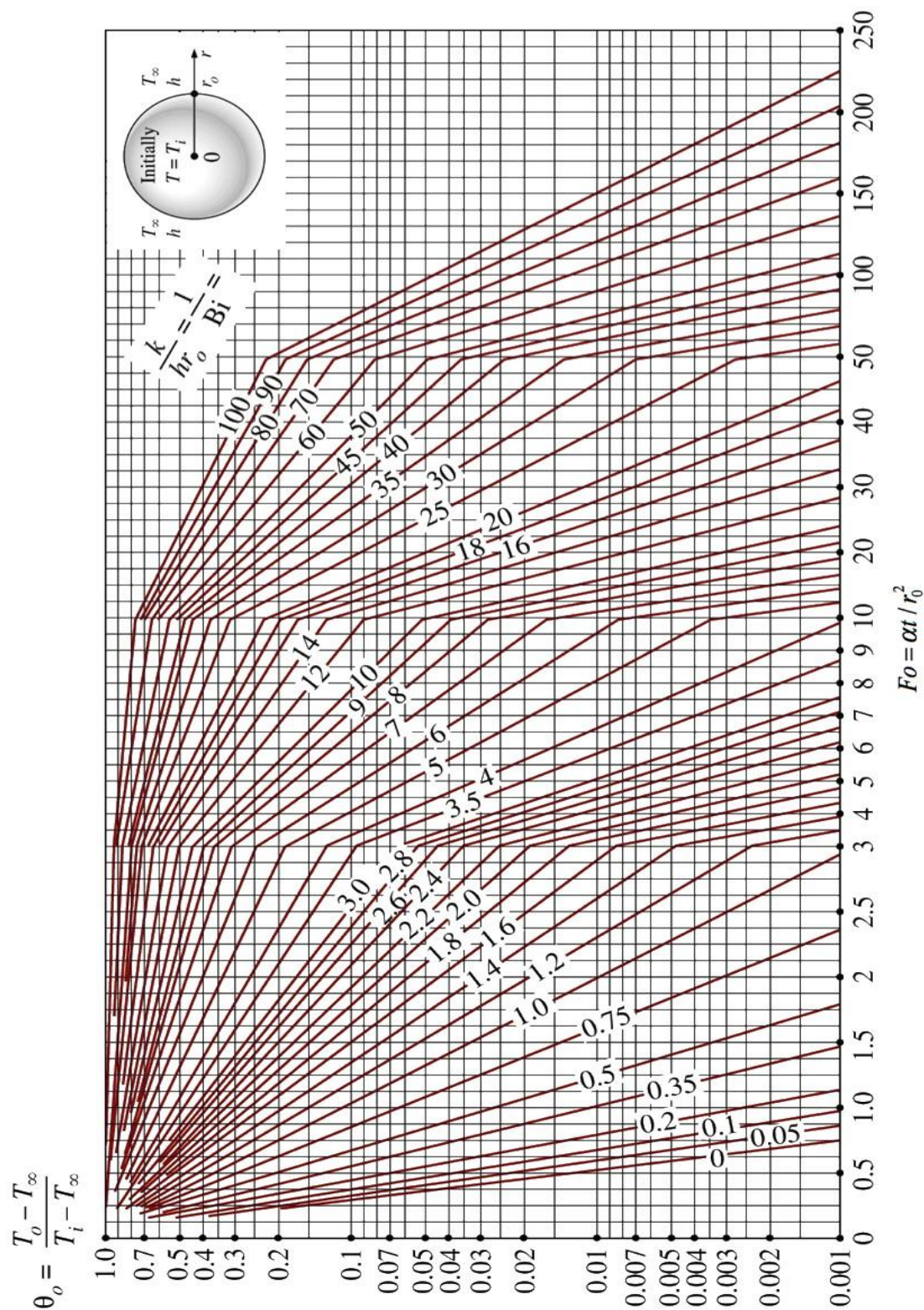
Conductividad de Y.S. Touloukian, P.E. Liley, S.C. Saxena "Thermophysical Properties of Matter – Vol 3", IFI/Plenum, NY, 1970 Viscosidad de Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans "Thermophysical Properties of Matter – Vol 11", IFI/Plenum, NY, 1970

Anexo 2. Ábaco de Heisler. Temperatura en el centro, placa plana.



Fuente: Çengel Y.A., *Transferencia de Calor*. 2ª ed. McGraw-Hill, 2006

Anexo 3. Ábaco de Heisler. Temperatura en el centro, esfera.



Fuente: Çengel Y.A., *Transferencia de Calor*. 2ª ed. McGraw-Hill, 2006

Anexo 4. Correlaciones empíricas.

Correlaciones conv. Forzada, flujo externo, placa plana, flujo paralelo.

Placa plana, flujo paralelo				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
5	$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, medio, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 50$	Tª media película	Polhausen
6	$\overline{Nu}_L = 0.6795 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	Laminar, medio, q_s cte	Tª media película	q cte
7	$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	Turbulento, local, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 60$, $Re_x \leq 10^8$	Tª de película	Analogía de Chilton-Colburn
8	$Nu_x = 0.029 Re_x^{4/5} Pr^{0.43}$	Turbulento, local, $0.7 \leq Pr < 380$, $10^5 < Re_x \leq 5.5 \cdot 10^6$	T_{∞}	Whitaker
9	$\overline{Nu}_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$	Turbulento, medio, T_s cte, $0.6 \leq Pr < 60$, $5 \cdot 10^5 < Re_x \leq 10^8$, $Re_c = 5 \cdot 10^5$	Tª media película	Analogía de Chilton-Colburn
10	$\overline{Nu}_L = (0.036 Re_L^{4/5} - 331) Pr^{0.43} (\mu / \mu_s)^{1/4}$	Turbulento, medio, $0.7 \leq Pr < 380$, $10^5 < Re_L \leq 5.5 \cdot 10^6$, $0.26 < \mu / \mu_s < 3.5$, $Re_c = 5 \cdot 10^5$	T_{∞} , menos μ_s a T_s	Whitaker

- La temperatura media de película es la media aritmética de las temperaturas de película.

- Para las correlaciones (8) y (10) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo μ_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Correlaciones conv. Forzada, flujo externo, esfera.

Esfera				
Nº	Correlación	Condiciones de aplicación	Tª Propiedades	Nombre
14	$\overline{Nu}_D = 2 + (0.48 Re_D^{1/2} + 0.06 Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu / \mu_s)^{1/4}$	Medio, $3.5 < Re_D < 7.6 \cdot 10^4$, $0.71 < Pr < 300$, $1 < \mu / \mu_s < 3.2$	T_{∞} , menos μ_s a T_s	Whitaker

- Para la correlación (14) las propiedades se evalúan a la temperatura exterior del fluido, salvo μ_s que se evalúa a la temperatura superficial

- Las correlaciones para transferencia de masa pueden obtenerse sustituyendo en las correlaciones anteriores Nu y Pr por Sh y Sc respectivamente.

Anexo 5. Campo de temperatura desecación natural ($T = 25^{\circ}\text{C}$) y artificial ($T = 50 / 60 / 70^{\circ}\text{C}$) de una uva.

t (s)	Desecación Natural						Desecación Artificial				
	Solo Convección			Convección + Radiación							
	Fo	θ	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fo	θ	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fo	θ	T 50 ($^{\circ}\text{C}$)	T 60 ($^{\circ}\text{C}$)	T 70 ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	1	10	0	1	10	0	1	10	10	10
200	0,375	0,7	14,5	0,375	0,6	16	0,375	0,7	22	25	28
266,666667	0,5	0,6	16	0,5	0,48	17,8	0,5	0,6	26	30	34
333,333333	0,625	0,5	17,5	0,625	0,39	19,15	0,625	0,5	30	35	40
400	0,75	0,42	18,7	0,75	0,3	20,5	0,75	0,42	33,2	39	44,8
466,666667	0,875	0,35	19,75	0,875	0,25	21,25	0,875	0,35	36	42,5	49
533,333333	1	0,3	20,5	1	0,2	22	1	0,3	38	45	52
600	1,125	0,25	21,25	1,125	0,16	22,6	1,125	0,25	40	47,5	55
666,666667	1,25	0,21	21,85	1,25	0,13	23,05	1,25	0,21	41,6	49,5	57,4
733,333333	1,375	0,18	22,3	1,375	0,095	23,575	1,375	0,18	42,8	51	59,2
800	1,5	0,16	22,6	1,5	0,078	23,83	1,5	0,15	44	52,5	61
866,666667	1,625	0,14	22,9	1,625	0,06	24,1	1,625	0,13	44,8	53,5	62,2
933,333333	1,75	0,11	23,35	1,75	0,05	24,25	1,75	0,105	45,8	54,75	63,7
1000	1,875	0,09	23,65	1,875	0,037	24,445	1,875	0,09	46,4	55,5	64,6
1066,666667	2	0,075	23,875	2	0,03	24,55	2	0,075	47	56,25	65,5
1200	2,25	0,05	24,25	2,25	0,02	24,7	2,25	0,05	48	57,5	67
1333,333333	2,5	0,038	24,43	2,5	0,013	24,805	2,5	0,038	48,48	58,1	67,72
1466,666667	2,75	0,025	24,625	2,75	0,008	24,88	2,75	0,025	49	58,75	68,5
1600	3	0,02	24,7	3	0,005	24,925	3	0,02	49,2	59	68,8
1866,666667	3,5	0,009	24,865	3,5	0,002	24,97	3,5	0,009	49,64	59,55	69,46
2133,333333	4	0,005	24,925	4	0,001	24,985	4	0,005	49,8	59,75	69,7
2666,666667	-	-	-	-	-	-	5	0,0015	49,94	59,925	69,91

Anexo 6. Determinación del coeficiente convectivo (D. Natural) a partir de: correlaciones conv. Forzada, flujo externo, esfera.

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	μ _s (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	25	1,2	0,016	1,56E-05	1229,981	1,007	1,85E-05	1,78E-05	2,55E-02	7,30E-01	23,121	36,863
15	25	1,2	0,016	1,56E-05	1229,981	1,007	1,85E-05	1,80E-05	2,55E-02	7,30E-01	23,050	36,750
25	25	1,2	0,016	1,56E-05	1229,981	1,007	1,85E-05	1,85E-05	2,55E-02	7,30E-01	22,915	36,535
Valor Medio												36,716

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	μ _s (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	25	2,2	0,016	1,56E-05	2254,965	1,007	1,85E-05	1,78E-05	2,55E-02	7,30E-01	31,480	50,191
15	25	2,2	0,016	1,56E-05	2254,965	1,007	1,85E-05	1,80E-05	2,55E-02	7,30E-01	31,381	50,034
25	25	2,2	0,016	1,56E-05	2254,965	1,007	1,85E-05	1,85E-05	2,55E-02	7,30E-01	31,193	49,733
Valor Medio												49,986

Correlaciones conv. Forzada, flujo externo, placa plana, flujo paralelo.

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	T _m (Ts+T/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	25	17,5	1,45	0,016	1,49E-05	1552,878	1,007	1,81E-05	2,50E-02	7,32E-01	23,579	36,768
15	25	20	1,45	0,016	1,52E-05	1530,343	1,007	1,83E-05	2,51E-02	7,31E-01	23,399	36,766
25	25	25	1,45	0,016	1,56E-05	1486,227	1,007	1,85E-05	2,55E-02	7,30E-01	23,048	36,747
Valor Medio												36,760

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	T _m (Ts+T/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	25	17,5	2,7	0,016	1,49E-05	2891,566	1,007	1,81E-05	2,50E-02	7,32E-01	32,175	50,173
15	25	20	2,7	0,016	1,52E-05	2849,604	1,007	1,83E-05	2,51E-02	7,31E-01	31,930	50,170
25	25	25	2,7	0,016	1,56E-05	2767,457	1,007	1,85E-05	2,55E-02	7,30E-01	31,450	50,144
Valor Medio												50,162

Determinación del coeficiente convectivo (D. Artificial) a partir de: correlaciones conv. Forzada, flujo externo, esfera.

T 50°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	μ _s (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	50	1,2	0,016	1,80E-05	1068,447	1,007	1,96E-05	1,78E-05	2,74E-02	7,23E-01	21,769	37,212
25	50	1,2	0,016	1,80E-05	1068,447	1,007	1,96E-05	1,85E-05	2,74E-02	7,23E-01	21,577	36,882
50	50	1,2	0,016	1,80E-05	1068,447	1,007	1,96E-05	1,96E-05	2,74E-02	7,23E-01	21,286	36,386
Valor Medio												36,827

T 60°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	μ _s (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	60	1,2	0,016	1,90E-05	1013,193	1,007	1,96E-05	1,78E-05	2,81E-02	7,04E-01	21,001	36,858
30	60	1,2	0,016	1,90E-05	1013,193	1,007	1,96E-05	1,87E-05	2,81E-02	7,04E-01	20,758	36,431
60	60	1,2	0,016	1,90E-05	1013,193	1,007	1,96E-05	2,01E-05	2,81E-02	7,04E-01	20,432	35,859
Valor Medio												36,382

T 70°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	μ _s (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	70	1,2	0,016	2,00E-05	962,406	1,007	2,05E-05	1,78E-05	2,88E-02	7,17E-01	20,82	37,49
40	70	1,2	0,016	2,00E-05	962,406	1,007	2,05E-05	1,92E-05	2,88E-02	7,17E-01	20,467	36,853
70	70	1,2	0,016	2,00E-05	962,406	1,007	2,05E-05	2,05E-05	2,88E-02	7,17E-01	20,158	36,297
Valor Medio												36,88

Correlaciones conv. Forzada, flujo externo, placa plana, flujo paralelo.

T 50°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts + T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	50	30	1,45	0,016	1,61E-05	1442,786	1,007	1,87E-05	2,59E-02	7,28E-01	22,693	36,706
25	50	37,5	1,45	0,016	1,68E-05	1382,598	1,007	1,91E-05	2,64E-02	7,26E-01	22,192	36,659
50	50	50	1,45	0,016	1,80E-05	1291,041	1,007	1,96E-05	2,74E-02	7,23E-01	21,411	36,599
Valor Medio												36,655

T 60°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts + T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	60	35	1,45	0,016	1,65E-05	1402,660	1,007	1,90E-05	2,63E-02	7,27E-01	22,360	36,685
30	60	45	1,45	0,016	1,75E-05	1326,472	1,007	1,94E-05	2,70E-02	7,24E-01	21,717	36,634
60	60	60	1,45	0,016	1,90E-05	1224,274	1,007	2,01E-05	2,81E-02	7,20E-01	20,824	36,547
Valor Medio												36,622

T 70°C												
T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts + T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m²/s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m²*K)
10	70	40	1,45	0,016	1,70E-05	1363,102	1,007	1,92E-05	2,66E-02	7,26E-01	22,029	36,650
40	70	55	1,45	0,016	1,85E-05	1256,771	1,007	1,99E-05	2,77E-02	7,21E-01	21,112	36,577
70	70	70	1,45	0,016	2,00E-05	1162,907	1,007	2,00E-05	2,88E-02	6,97E-01	20,079	36,155
Valor Medio												36,461

Anexo 7. Evolución de la humedad (X) en la desecación natural ($T = 25^{\circ}\text{C}$) de una uva; solo convección y convección + radiación.

t (s)	Solo Convección					Convección + Radiación				
	$T_{x^*} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{Adimensional}}$	$C_A(\text{kmol/m}^3)$	C_A (molar)	X	$T_{x^*} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{Adimensional}}$	$C_A(\text{kmol/m}^3)$	C_A (molar)	X
0	10	0	0,0046	1	1	10	0	0,0046	1	1
200	14,5	0,3	0,00322	0,70682927	0,70682927	16	0,4	0,00276	0,60585366	0,60585366
266,666667	16	0,4	0,00276	0,60585366	0,60585366	17,8	0,52	0,002208	0,48468293	0,48468293
333,333333	17,5	0,5	0,0023	0,50487805	0,50487805	19,15	0,61	0,001794	0,39380488	0,39380488
400	18,7	0,58	0,001932	0,42409756	0,42409756	20,5	0,7	0,00138	0,30292683	0,30292683
466,666667	19,75	0,65	0,00161	0,35341463	0,35341463	21,25	0,75	0,00115	0,25243902	0,25243902
533,333333	20,5	0,7	0,00138	0,30292683	0,30292683	22	0,8	0,00092	0,20195122	0,20195122
600	21,25	0,75	0,00115	0,25243902	0,25243902	22,6	0,84	0,000736	0,16156098	0,16156098
666,666667	21,85	0,79	0,000966	0,21204878	0,21204878	23,05	0,87	0,000598	0,13126829	0,13126829
733,333333	22,3	0,82	0,000828	0,1817561	0,1817561	23,575	0,905	0,000437	0,09592683	0,09592683
800	22,6	0,84	0,000736	0,16156098	0,16156098	23,83	0,922	0,0003588	0,07876098	0,07876098
866,666667	22,9	0,86	0,000644	0,14136585	0,14136585	24,1	0,94	0,000276	0,06058537	0,06058537
933,333333	23,35	0,89	0,000506	0,11107317	0,11107317	24,25	0,95	0,00023	0,0504878	0,0504878
1000	23,65	0,91	0,000414	0,09087805	0,09087805	24,445	0,963	0,0001702	0,03736098	0,03736098
1066,66667	23,875	0,925	0,000345	0,07573171	0,07573171	24,55	0,97	0,000138	0,03029268	0,03029268
1200	24,25	0,95	0,00023	0,0504878	0,0504878	24,7	0,98	9,20E-05	0,02019512	0,02019512
1333,33333	24,43	0,962	0,0001748	0,03837073	0,03837073	24,805	0,987	5,98E-05	0,01312683	0,01312683
1466,66667	24,625	0,975	0,000115	0,0252439	0,0252439	24,88	0,992	3,68E-05	0,00807805	0,00807805
1600	24,7	0,98	9,20E-05	0,02019512	0,02019512	24,925	0,995	0,000023	0,00504878	0,00504878
1866,66667	24,865	0,991	4,14E-05	0,0090878	0,0090878	24,97	0,998	9,20E-06	0,00201951	0,00201951
2133,33333	24,925	0,995	0,000023	0,00504878	0,00504878	24,985	0,999	0,0000046	0,00100976	0,00100976

Evolución de la humedad (X) en la desecación artificial (T =50 / 60 / 70°C) de una uva.

	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C	T 50, T 60 y T 70 °C			
t (s)	T x* (°C)	T x* (°C)	T x* (°C)	T Adimensional	C _A (x*) (kmol/m ³)	C _A (molar)	X
0	10	10	10	0	0,0046	1	1
200	22	25	28	0,3	0,00322	0,70682927	0,70682927
266,666667	26	30	34	0,4	0,00276	0,60585366	0,60585366
333,333333	30	35	40	0,5	0,0023	0,50487805	0,50487805
400	33,2	39	44,8	0,58	0,001932	0,42409756	0,42409756
466,666667	36	42,5	49	0,65	0,00161	0,35341463	0,35341463
533,333333	38	45	52	0,7	0,00138	0,30292683	0,30292683
600	40	47,5	55	0,75	0,00115	0,25243902	0,25243902
666,666667	41,6	49,5	57,4	0,79	0,000966	0,21204878	0,21204878
733,333333	42,8	51	59,2	0,82	0,000828	0,1817561	0,1817561
800	44	52,5	61	0,85	0,00069	0,15146341	0,15146341
866,666667	44,8	53,5	62,2	0,87	0,000598	0,13126829	0,13126829
933,333333	45,8	54,75	63,7	0,895	0,000483	0,10602439	0,10602439
1000	46,4	55,5	64,6	0,91	0,000414	0,09087805	0,09087805
1066,66667	47	56,25	65,5	0,925	0,000345	0,07573171	0,07573171
1200	48	57,5	67	0,95	0,00023	0,0504878	0,0504878
1333,33333	48,48	58,1	67,72	0,962	0,0001748	0,03837073	0,03837073
1466,66667	49	58,75	68,5	0,975	0,000115	0,0252439	0,0252439
1600	49,2	59	68,8	0,98	9,20E-05	0,02019512	0,02019512
1866,66667	49,64	59,55	69,46	0,991	0,0000414	0,0090878	0,0090878
2133,33333	49,8	59,75	69,7	0,995	2,30E-05	0,00504878	0,00504878
2666,66667	49,94	59,925	69,91	0,9985	6,90E-06	0,00151463	0,00151463

Anexo 8. Campo de temperatura desecación natural ($T = 25^{\circ}\text{C}$) y artificial ($T = 50 / 60 / 70^{\circ}\text{C}$) de n uvas.

	Desecación Natural			
	P. Plana (e=0,01 m)		Sistema Bidimensional	
t (s)	Fo	θ	$\theta \times \theta$	T (°C)
0	0	1	1	10
2166,66667	2,6	0,79	0,79	13,15
2500	3	0,76	0,76	13,6
3333,33333	4	0,7	0,68	14,8
4166,66667	5	0,62	0,6	16
5000	6	0,51	0,52	17,2
5833,33333	7	0,47	0,46	18,1
6666,66667	8	0,42	0,42	18,7
7500	9	0,37	0,37	19,45
8333,33333	10	0,35	0,34	19,9
9166,66667	11	0,33	0,3	20,5
10000	12	0,28	0,28	20,8
11666,6667	14	0,23	0,23	21,55
15000	18	0,15	0,15	22,75
18333,3333	22	0,095	0,095	23,575
21666,6667	26	0,065	0,065	24,025
23333,3333	28	0,051	0,051	24,235
25000	30	0,035	0,035	24,475
29166,6667	35	0,02	0,02	24,7
33333,3333	40	0,013	0,013	24,805
37500	45	0,007	0,007	24,895
50000	60	0,0015	0,0015	24,9775

	Desecación Artificial					
	P. Plana (e = 0,01 m)		Sistema Bidimensional			
t (s)	Fo	θ	$\theta \times \theta$	T 50 (°C)	T 60 (°C)	T 70 (°C)
0	0	1	1	10	10	10
3333,33333	4	0,75	0,75	20	22,5	25
5000	6	0,62	0,62	25,2	29	32,8
6666,66667	8	0,52	0,52	29,2	34	38,8
8333,33333	10	0,45	0,45	32	37,5	43
10000	12	0,38	0,38	34,8	41	47,2
11666,6667	14	0,33	0,33	36,8	43,5	50,2
13333,3333	16	0,28	0,28	38,8	46	53,2
15000	18	0,24	0,24	40,4	48	55,6
16666,6667	20	0,2	0,2	42	50	58
19166,6667	23	0,15	0,15	44	52,5	61
21666,6667	26	0,12	0,12	45,2	54	62,8
23333,3333	28	0,1	0,1	46	55	64
25000	30	0,08	0,08	46,8	56	65,2
29166,6667	35	0,05	0,05	48	57,5	67
33333,3333	40	0,035	0,035	48,6	58,25	67,9
37500	45	0,025	0,025	49	58,75	68,5
41666,6667	50	0,018	0,018	49,28	59,1	68,92
45833,3333	55	0,01	0,01	49,6	59,5	69,4
50000	60	0,006	0,006	49,76	59,7	69,64
58333,3333	70	0,0035	0,0035	49,86	59,825	69,79
70833,3333	85	0,001	0,001	49,96	59,95	69,94

Anexo 9. Determinación del coeficiente convectivo (D. Natural): correlaciones conv. Forzada, flujo externo, placa plana.

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts+T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	25	17,5	2,7	0,016	1,49E-05	2891,566	1,007	1,81E-05	2,50E-02	7,32E-01	32,175	50,173
15	25	20	2,7	0,016	1,52E-05	2849,604	1,007	1,83E-05	2,51E-02	7,31E-01	31,930	50,170
25	25	25	2,7	0,016	1,56E-05	2767,457	1,007	1,85E-05	2,55E-02	7,30E-01	31,450	50,144
Valor Medio												50,162

Determinación del coeficiente convectivo (D. Artificial) a partir de: correlaciones conv. Forzada, flujo externo, placa plana.

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts + T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	50	30	1,45	1	1,61E-05	90174,129	1,007	1,87E-05	2,59E-02	7,28E-01	179,404	4,643
25	50	37,5	1,45	1	1,68E-05	86412,396	1,007	1,91E-05	2,64E-02	7,26E-01	175,445	4,637
50	50	50	1,45	1	1,80E-05	80690,039	1,007	1,96E-05	2,74E-02	7,23E-01	169,268	4,629
Valor Medio												4,636

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts + T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	60	35	1,45	1	1,65E-05	87666,264	1,007	1,90E-05	2,63E-02	7,27E-01	176,775	4,640
30	60	45	1,45	1	1,75E-05	82904,517	1,007	1,94E-05	2,70E-02	7,24E-01	171,689	4,634
60	60	60	1,45	1	1,90E-05	76517,150	1,007	2,01E-05	2,81E-02	7,20E-01	164,631	4,623
Valor Medio												4,632

T Uvas (°C)	T ∞ (°C)	Tm (Ts+ T∞/2)	U (m/s)	D (m)	ν (m ² /s)	Re	Cp (KJ/kg*K)	μ (N*s/m ²)	k (W/m*K)	Pr	Nusselt	h (W/m ² *K)
10	70	40	1,45	1	1,70E-05	85193,890	1,007	1,92E-05	2,66E-02	7,26E-01	174,152	4,636
40	70	55	1,45	1	1,85E-05	78548,212	1,007	1,99E-05	2,77E-02	7,21E-01	166,907	4,627
70	70	70	1,45	1	2,00E-05	72681,704	1,007	2,00E-05	2,88E-02	6,97E-01	158,741	4,573
Valor Medio												4,611978901

Anexo 10. Evolución de la humedad (X) en la desecación natural ($T = 25^{\circ}\text{C}$) de n uva.

t (s)	T_{x^*} ($^{\circ}\text{C}$)	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{Adimensional}}$	$C_{A(x^*)}$ (kmol/m ³)	C_A (molar)	$M_x \text{ H}_2\text{O}$ (kg)	$M_i \text{ H}_2\text{O}$ (kg)	X
0	10	10	25	0	0,0046	1	0,0054	0,0054	1
2166,66667	13,15	10	25	0,21	0,003634	0,79770732	0,00430762	0,0054	0,79770732
2500	13,6	10	25	0,24	0,003496	0,76741463	0,00414404	0,0054	0,76741463
3333,33333	14,8	10	25	0,32	0,003128	0,68663415	0,00370782	0,0054	0,68663415
4166,66667	16	10	25	0,4	0,00276	0,60585366	0,00327161	0,0054	0,60585366
5000	17,2	10	25	0,48	0,002392	0,52507317	0,0028354	0,0054	0,52507317
5833,33333	18,1	10	25	0,54	0,002116	0,4644878	0,00250823	0,0054	0,4644878
6666,66667	18,7	10	25	0,58	0,001932	0,42409756	0,00229013	0,0054	0,42409756
7500	19,45	10	25	0,63	0,001702	0,37360976	0,00201749	0,0054	0,37360976
8333,33333	19,9	10	25	0,66	0,001564	0,34331707	0,00185391	0,0054	0,34331707
9166,66667	20,5	10	25	0,7	0,00138	0,30292683	0,0016358	0,0054	0,30292683
10000	20,8	10	25	0,72	0,001288	0,28273171	0,00152675	0,0054	0,28273171
11666,6667	21,55	10	25	0,77	0,001058	0,2322439	0,00125412	0,0054	0,2322439
15000	22,75	10	25	0,85	0,00069	0,15146341	0,0008179	0,0054	0,15146341
18333,3333	23,575	10	25	0,905	0,000437	0,09592683	0,000518	0,0054	0,09592683
21666,6667	24,025	10	25	0,935	0,000299	0,06563415	0,00035442	0,0054	0,06563415
23333,3333	24,235	10	25	0,949	0,0002346	0,05149756	0,00027809	0,0054	0,05149756
25000	24,475	10	25	0,965	0,000161	0,03534146	0,00019084	0,0054	0,03534146
29166,6667	24,7	10	25	0,98	9,2E-05	0,02019512	0,00010905	0,0054	0,02019512
33333,3333	24,805	10	25	0,987	5,98E-05	0,01312683	7,0885E-05	0,0054	0,01312683
37500	24,895	10	25	0,993	0,0000322	0,00706829	3,8169E-05	0,0054	0,00706829
50000	24,9775	10	25	0,9985	6,9E-06	0,00151463	8,179E-06	0,0054	0,00151463

Datos: evolución de la humedad (X) en la desecación artificial (T =50 / 60 / 70°C) de n uva.

t (s)	T x1* (°C)	T x2* (°C)	T x3* (°C)	T Adimensional	C _A (x*) (kmol/m3)	C _A (molar)	M _x H ₂ O (kg)	M _i H ₂ O (kg)	X
0	10	10	10	0	0,0046	1	0,0054	0,0054	1
3333,33333	20	22,5	25	0,25	0,00345	0,75731707	0,00408951	0,0054	0,75731707
5000	25,2	29	32,8	0,38	0,002852	0,62604878	0,00338066	0,0054	0,62604878
6666,66667	29,2	34	38,8	0,48	0,002392	0,52507317	0,0028354	0,0054	0,52507317
8333,33333	32	37,5	43	0,55	0,00207	0,45439024	0,00245371	0,0054	0,45439024
10000	34,8	41	47,2	0,62	0,001748	0,38370732	0,00207202	0,0054	0,38370732
11666,6667	36,8	43,5	50,2	0,67	0,001518	0,33321951	0,00179939	0,0054	0,33321951
13333,3333	38,8	46	53,2	0,72	0,001288	0,28273171	0,00152675	0,0054	0,28273171
15000	40,4	48	55,6	0,76	0,001104	0,24234146	0,00130864	0,0054	0,24234146
16666,6667	42	50	58	0,8	0,00092	0,20195122	0,00109054	0,0054	0,20195122
19166,6667	44	52,5	61	0,85	0,00069	0,15146341	0,0008179	0,0054	0,15146341
21666,6667	45,2	54	62,8	0,88	0,000552	0,12117073	0,00065432	0,0054	0,12117073
23333,3333	46	55	64	0,9	0,00046	0,10097561	0,00054527	0,0054	0,10097561
25000	46,8	56	65,2	0,92	0,000368	0,08078049	0,00043621	0,0054	0,08078049
29166,6667	48	57,5	67	0,95	0,00023	0,0504878	0,00027263	0,0054	0,0504878
33333,3333	48,6	58,25	67,9	0,965	0,000161	0,03534146	0,00019084	0,0054	0,03534146
37500	49	58,75	68,5	0,975	0,000115	0,0252439	0,00013632	0,0054	0,0252439
41666,6667	49,28	59,1	68,92	0,982	8,28E-05	0,01817561	9,81E-05	0,0054	0,01817561
45833,3333	49,6	59,5	69,4	0,99	0,000046	0,01009756	5,45E-05	0,0054	0,01009756
50000	49,76	59,7	69,64	0,994	0,0000276	0,00605854	3,27E-05	0,0054	0,00605854
58333,3333	49,86	59,825	69,79	0,9965	1,61E-05	0,00353415	1,91E-05	0,0054	0,00353415
70833,3333	49,96	59,95	69,94	0,999	0,0000046	0,00100976	5,45E-06	0,0054	0,00100976