

Trabajo de Fin de Máster  
Máster Universitario en Sistemas de Energía Térmica

Estudio del comportamiento térmico de un secadero solar tipo domo para productos agrícolas

Autor: Sandra Vergara Dávila

Tutor: José Julio Guerra Macho

**Dep. Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo de Fin de Máster  
Máster Universitario en Sistemas de Energía Térmica

# Estudio del comportamiento térmico de un secadero solar tipo domo para productos agrícolas

Autor:  
Sandra Vergara Dávila

Tutor:  
José Julio Guerra Macho  
Catedrático de Universidad

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster: Estudio del comportamiento térmico de un secadero solar tipo domo para productos agrícolas

Autor: Sandra Vergara Dávila

Tutor: José Guerra Macho

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y amigos.*

*A Augustito.*

*Al GRUPO-PUCP.*



# Agradecimientos

---

La posibilidad de seguir avanzando con mis estudios aparece con el apoyo y confianza de distintos miembros de mi lugar de trabajo, la Pontificia Universidad Católica del Perú, como el Ing. Carlos Fosca y el Ing. Juan Carlos Dextre; así como, Miguel Hadzich, director del Grupo de Apoyo al Sector Rural, un gran amigo, quien durante todos estos años ha compartido conmigo su curiosidad sobre las energías renovables, la energía solar térmica y nuestro mundo.

A mi asesor, José Guerra por su paciencia, dedicación y amor a la enseñanza.

*Sandra Vergara Dávila*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

La globalización ha permitido que varios productos de la biodiversidad se comercialicen en diferentes partes del mundo. Entre ellos, los ajíes o chiles son uno de los productos favoritos que se utilizan en todas las cocinas del mundo para preparar platos exóticos, con nuevos sabores de América Latina y Asia. Generalmente, este producto tiene un contenido de humedad inicial de alrededor del 270% en base seca.

Esta tesis permite realizar un análisis paramétrico del modelo térmico de un secador tipo domo con circulación forzada que permitirá predecir su comportamiento hasta que se obtenga un producto con un 10% de contenido de humedad en base seca.



# Abstract

---

Globalization has allowed several biodiversity products to be marketed in different parts of the world. Among them, chilies are one of the favorite products used in all the world's kitchens to prepare exotic dishes, with new flavors from Latin America and Asia. Generally, this product has an initial moisture content of around 270% on a dry basis.

This thesis allows a parametric analysis of the thermal model of a dome dryer with forced circulation that will predict its behavior until a product with a 10% moisture content in dry basis is obtained.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo</i>	1
1.2 <i>Radiación Solar</i>	4
1.2.1 Absortividad, transmisividad y reflectividad	6
1.2.2 Año típico meteorológico	7
1.2.3 Efecto Invernadero	7
1.3 <i>Energía Solar Térmica</i>	7
1.3.1 Aplicaciones	8
1.3.2 Secado solar	12
1.3.3 Estado del arte	17
<b>2 Comportamiento de un secador tipo domo</b>	<b>27</b>
2.1 <i>Secador solar tipo domo</i>	27
2.1.1 Principio de funcionamiento	27
2.1.2 Elementos del secador solar tipo domo	28
2.2 <i>Modelo del comportamiento térmico</i>	28
2.2.1 Análisis del flujo másico del aire	29
2.2.2 Análisis de transferencia radiante en el producto	30
2.3 <i>Balances de Energía</i>	32
2.3.1 Balance de energía del aire al interior del domo	32
2.3.2 Balance de energía en la cubierta	32
2.3.3 Balance de energía en el producto	32
2.3.4 Balance de energía en el suelo	32
2.4 <i>Balances de masas</i>	33
2.5 <i>Modelo secado de una sola capa</i>	33
2.6 <i>Coefficientes de transferencia de calor</i>	34
2.6.1 Coeficientes radiantes	34
2.6.2 Coeficientes convectivo	39

2.7	<i>Correlaciones en función de la temperatura</i>	41
2.8	<i>Metodología</i>	43
<b>3</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>45</b>
3.1	<i>Caso base</i>	46
3.2	<i>Análisis de sensibilidad de velocidad de secado.</i>	48
3.3	<i>Análisis de sensibilidad de la masa seca del producto.</i>	51
3.4	<i>Análisis de sensibilidad de la transmisividad de la cubierta.</i>	51
3.5	<i>Análisis de sensibilidad para otros meses del año.</i>	52
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>54</b>
	<b>Referencias</b>	<b>56</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Enlaces entre las energías renovables en el ODS7 y otros ODS [1]	2
Figura 1-2. Capacidad total de generación de energía renovable. [4]	3
Figura 1-3. Mapa mundial de la radiación global horizontal [5]	3
Figura 1-4. Espectro de las ondas electromagnéticas provenientes del sol. [6]	4
Figura 1-5. Distribución espectral de la radiación solar fuera de la atmósfera y en la superficie de la tierra en comparación con la radiación de un cuerpo negro a la temperatura del sol. [7]	5
Figura 1-6. Radiación directa y difusa que inciden en una superficie horizontal. [7]	5
Figura 1-7. Ángulos relacionados con la posición solar para el hemisferio norte. [8]	6
Figura 1-8. Procesos de absorción, reflexión y transmisión espectral asociados con un medio semitransparente. [9]	7
Figura 1-9. Horno solar empleado por Lavoisier. [10]	8
Figura 1-10. Captadores solares. [11]	8
Figura 1-11. Configuración para agua caliente sanitaria. [8]	10
Figura 1-12. Tipos de concentradores; a) Concentrador Parabólico lineal, b) Fresnel, c) disco parabólico d) de torre. [12]	11
Figura 1-13. Flujo de calor del secado al sol [13]	12
Figura 1-14. Flujo de masa del secado al sol [13]	13
Figura 1-15. Proceso de secado para un aire que ingresa a 20°C y sale con un 80% de humedad relativa [13]	13
Figura 1-16. Secadores solares típicos. [14]	14
Figura 1-17. Comparación de secadores solares tipo integral y distribuido por transferencia de calor, costos y eficiencia [14]	16
Figura 1-18. El número de publicaciones en diferentes temas y subtemas de la energía solar térmica. [15]	18
Figura 1-19. Evolución del número de artículos científicos publicados a través de Science Direct sobre el secado solar, secadores solares y el modelamiento de dicha tecnología.	19
Figura 1-20. Importaciones de ajíes secos en Europa entre 2013-2017 provenientes de países en vías de desarrollo y Europa. [18]	20
Figura 1-21. Importaciones de ajíes secos en Europa entre 2013-2017 provenientes de países en vías de desarrollo y Europa. [18]	21
Figura 1-22. Izquierda: curvas de secado. Derecha: Representación de secadores convectivos [21].	24
Figura 2-1. Secador solar tipo domo. Izquierda: Sección de vista lateral. Derecha: Sección de vista superior.	28
Figura 2-2. Caja negra del secador con variables de entrada y variables de salida.	29
Figura 2-3. Relación del flujo másico al interior del domo.	30

Figura 2-4. Análisis de transferencia radiante en el producto.	31
Figura 2-5. Coeficientes convectivos, radiantes y conductivos de transferencia de calor que interactúan en un secador tipo domo	31
Figura 2-6. Radiosidad conformada por la radiación reflejada y la emitida. [7]	34
Figura 2-7. Izquierda: superficies en el interior del domo. Derecha: relación de los factores de forma	36
Figura 2-8. Resolución mediante analogía eléctrica	37
Figura 2-9. Viscosidad dinámica del aire húmedo a diferentes humedades relativas	41
Figura 2-10. Conductividad térmica del aire húmedo a diferentes humedades relativas	42
Figura 2-11. Calor específico del aire húmedo a diferentes humedades relativas	42
Figura 2-12. Densidad del aire húmedo a diferentes humedades relativas	42
Figura 3-1. Temperaturas y radiación solar vs tiempo para el caso base	47
Figura 3-2. Contenido de humedad del producto y humedad relativa vs tiempo para el caso base	47
Figura 3-3. Contenido de humedad del producto y radiación solar vs tiempo para el caso base	48
Figura 3-4. Contenido de humedad del producto e irradiación solar global frente al tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.	49
Figura 3-5. Contenido de humedad en el producto y humedad relativa a la salida del domo vs tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.	50
Figura 3-6. Contenido de humedad en el producto y temperatura del aire dentro del domo vs tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.	50
Figura 3-7. Contenido de humedad del producto e irradiación solar global frente al tiempo para diferentes masas de producto seco.	51
Figura 3-8: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global en función del tiempo para una transmitancia de cobertura diferente.	52
Figura 3-9: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global vs tiempo para febrero	53
Figura 3-10: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global vs tiempo para junio	53

## Notación

---

$A_c$	Área de la cubierta [m <sup>2</sup> ]
$A_f$	Área del suelo [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área total del producto [m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Área de superficie [m]
$C$	Velocidad de secado [m/s]
$C_p$	Calor específico [J/KgK]
$C_{pa}$	Calor específico del aire [J/kgK]
$C_{pc}$	Calor específico de la cubierta [J/kgK]
$C_{pl}$	Calor específico del líquido del producto [J/kgK]
$C_{pp}$	Calor específico del producto [J/kgK]
$C_{pv}$	Calor específico del vapor del producto [J/kgK]
$D_p$	Altura del producto [m]
$d$	Diámetro de la sección de la salida del aire por la parte superior de la cubierta [m]
$F_p$	Fracción solar de irradiación en el producto en relación al área de cubierta [-]
$h$	Coefficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]
$hc_{c-a}$	Coefficiente convectivo entre cubierta y aire del domo [W/m <sup>2</sup> K]
$hc_{c-amb}$	Coefficiente convectivo entre cubierta y aire del ambiente [W/m <sup>2</sup> K]

$hc_{f-a}$	Coefficiente convectivo entre suelo y aire del domo [W/m <sup>2</sup> K]
$hc_{p-a}$	Coefficiente convectivo entre producto y aire del domo [W/m <sup>2</sup> K]
$hk_{f-g}$	Coefficiente conductivo del suelo al foco de temperatura constante en el subsuelo [W/mK]
$hr_{c-s}$	Coefficiente radiante entre cubierta y el cielo [W/m <sup>2</sup> K]
$hr_{f-c}$	Coefficiente radiante entre suelo y cubierta [W/m <sup>2</sup> K]
$hr_{f-p}$	Coefficiente radiante entre suelo y producto [W/m <sup>2</sup> K]
$hr_{p-c}$	Coefficiente radiante entre producto y cubierta [W/m <sup>2</sup> K]
$I$	Radiación Global Horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$i$	Superficie (1, 2, 3 ,4)
$K$	Tasa constante de secado del producto [-/min]
$k$	Conductividad térmica [W/mK]
$kc$	Conductividad térmica de la cubierta [W/mK]
$kf$	Conductividad térmica del suelo [W/mK]
$kp$	Conductividad térmica del producto [W/mK]
$Lb$	Longitud característica de la bandeja [m]
$Lc$	Longitud característica [m]
$Ld$	Longitud característica del domo [m]
$Lp$	Calor latente de evaporización del líquido del producto [J/Kg]
$M^{\circ}$	Intensidad de cuerpo negro [W/m <sup>2</sup> ]
$Mi^{\circ}$	Intensidad de cuerpo de superficie $i$ [W/m <sup>2</sup> ]
$MPi$	Masa del producto total inicialmente [kg]
$ma$	Masa del aire dentro del domo [kg]
$mc$	Masa de la cubierta [Kg]
$mp$	Masa seca del producto [kg]
$\dot{m}_a$	Flujo másico de aire [kg/s]
$Nu$	Número adimensional de Nusselt [-]
$Pr$	Número adimensional de Prandtl
$Q_{rcs}$	Calor radiante transferido de la cubierta al cielo [W]
$Q_{rsp}$	Calor radiante transferido del suelo al producto
$Q_1$	Calor entregado por superficie 1 [W/m <sup>2</sup> ]
$Q_2$	Calor entregado por superficie 2 [W/m <sup>2</sup> ]
$Q_4$	Calor entregado por superficie 4 [W/m <sup>2</sup> ]
$RH$	Humedad relativa del aire ambiente [-]
$RHD$	Humedad relativa en el interior del domo [-]
$RHs$	Humedad relativa a la salida del domo [%]
$Re$	Número adimensional de Reynolds [-]
$ReFA$	Número de Reynolds para fluido entre suelo y aire del domo [-]
$RePA$	Número de Reynolds para flujo entre producto y aire del domo [-]
$Ta$	Temperatura del aire dentro del domo [K]
$Tamb$	Temperatura del aire ambiente [K]
$Tc$	Temperatura de la cubierta del domo [K]
$Tf$	Temperatura del suelo [K]
$T_i$	Temperatura de superficie [K]
$Tp$	Temperatura del producto dentro del domo [K]

$T_s$	Temperatura del cielo [K]
$T_\infty$	Temperatura del foco constante en el subsuelo [K]
$t$	Tiempo [min]
$V$	Velocidad del fluido [m/s]
$V_d$	Volumen del domo [m <sup>3</sup> ]
$V_{in}$	Caudal de aire a la entrada [m <sup>3</sup> /s]
$V_{out}$	Caudal de aire a la salida [m <sup>3</sup> /s]
$v_e$	Velocidad de entrada del fluido [m/s]
$v_s$	Velocidad de salida del fluido [m/s]
$v_v$	Velocidad del viento fuera del domo [m/s]
$W$	Humedad específica [Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco]
$W_{in}$	Humedad específica al ingreso del domo [Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco]
$W_{out}$	Humedad específica a la salida del domo [Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco]
$X$	Contenido de humedad del producto [db, %]
$X_e$	Contenido de humedad en el equilibrio dinámico [Xe]
$X_{pi}$	Contenido de humedad del producto inicialmente [db, decimal]
$X_p$	Contenido de humedad del producto [db, decimal]
$x$	Distancia [m]
$z$	Altura de la entrada del aire por la parte inferior de la cubierta [m]
$z_b$	Altura a la que se encuentra la bandeja [m]
$\alpha_c$	Absortividad de la cubierta [-]
$\alpha_f$	Absortividad del suelo [-]
$\alpha_p$	Absortividad del producto [-]
$\Delta x$	Incremento de distancia [m]
$\varepsilon_c$	Emisividad de la cubierta [-]
$\varepsilon_i$	Emisividad de superficie [-]
$\mu$	Viscosidad dinámica [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\mu_d$	Viscosidad dinámica del aire al interior del domo [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho_a$	Densidad del aire ambiente húmedo [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ad}$	Densidad del aire húmedo dentro del domo [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{aout}$	Densidad del aire seco a la salida del domo [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ain}$	Densidad del aire seco a la entrada del domo [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Densidad del producto [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Coefficiente de Stefan Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\tau_c$	Transmisividad del producto [-]

# 1 INTRODUCCIÓN

---

*“One, remember to look up at the stars and not down at your feet. Two, never give up work. Work gives you meaning and purpose and life is empty without it. Three, if you are lucky enough to find love, remember it is there and don't throw it away.”*

*- Stephen Hawking -*

En este primer capítulo del trabajo de fin de máster se busca establecer los objetivos y motivación del empleo de la energía solar para procesos industriales como es el secado de productos agrícolas. Por otro lado, se realiza una revisión sobre la radiación solar, la energía solar térmica y su aplicación en el secado solar y finalmente el estado del arte.

## 1.1 Objetivo

Hoy en día la demanda mundial de energía sigue en aumento, encabezada por los países en desarrollo, por diversos motivos como la industrialización, crecimiento poblacional y la propia expansión de la economía global. Sin embargo, los impactos sociales, económicos, y sobre todo ambientales negativos por depender tan fuertemente de los combustibles fósiles han generado que en los últimos años se busque migrar a los gobiernos a recursos renovables para poder satisfacer dicha demanda. Este nuevo camino ha generado frutos por el apoyo político y rápido desarrollo tecnológico de las energías renovables haciéndolas viables y rentables.

A partir del Acuerdo de París en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en el 2015, los países firmantes aceptaron como principal objetivo que el aumento de la temperatura media mundial fuese por debajo de los 2°C sobre los niveles preindustriales. Es así como cada país establece las acciones para alcanzar dicho objetivo a través de las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC siglas en inglés) siendo la transición a la energía renovable un elemento central para la transición energética y una herramienta para alcanzar así lo objetivos climáticos planteados al disminuir la generación de gases contaminantes. Sin embargo, a pesar del rápido crecimiento de las energías renovables con un crecimiento de la capacidad instalada en promedio de 8.5% por año entre 2010 y 2016, los objetivos e implementación de los NDC no refleja el ritmo actual de despliegue de las energías renovables. Esto se relaciona a que los NDC suelen ser menos ambiciosos que los propios planes y estrategias nacionales de energía. Por otro lado, los NDC se enfocan generalmente a la generación de electricidad siendo muy pocos los que incluyen objetivos relacionados con la producción de biocombustibles líquidos, biogás y termas solares [1].

A su vez, se cuentan con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, enfocados para 2015-2030, conocidos mundialmente como ODS por sus siglas en inglés y son una iniciativa de las Naciones Unidas para impulsar continuidad de la agenda de los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Dentro de estos objetivos se encuentra el relacionado a las energías renovables para garantizar el "acceso a una energía ordenada, confiable, sostenible y moderna para todos" (ODS7). La diversidad de las energías renovables no sólo permite contar con alguna opción

rentable, fácilmente disponible y adaptable a las necesidades básicas de los seres humanos sino también mejorar la salud humana, los ingresos y la productividad. La introducción de dichas tecnologías a nuevos mercados trae consigo nuevas industrias y la creación de nuevos puestos de trabajo. Es así también importante el impacto positivo de la introducción de las energías renovables a nivel local y global; por un lado, la contribución al cambio climático y por otro, la energía urbana sostenible para calefacción, refrigeración, generación local y así asegurar el cuidado de los ecosistemas y la biodiversidad; y lo relevancia tanto en la mitigación como la adaptación al cambio climático. Finalmente, las energías renovables en combinación con la eficiencia energética juegan un papel importante para el desarrollo social ya que brindan beneficios para la salud, igualdad de género y oportunidades educativas; desde reducir el tiempo de recolección de leña por el empleo de cocinas mejoradas o la calefacción y electricidad de escuelas en zonas remotas con energías renovables para un correcto desempeño de los niños y mayor acceso a la información, entre otros [2].



Figura 1-1. Enlaces entre las energías renovables en el ODS7 y otros ODS [1]

Al mencionar las energías renovables se debe entender que estas abarcan una gran diversidad de tecnologías a partir de diferentes recursos naturales y que nos permiten suministrar electricidad, energía térmica, mecánica y en los últimos años producir combustibles todo esto con la finalidad de satisfacer las diversas demandas energéticas a nivel doméstico e industrial. Así mismo, si estas se adoptan en el lugar de consumo se les suele conocer como régimen descentralizado; mientras que aquellas que inyectan la generación a una red de suministro se caracterizan por ser de mayor tamaño y conocerse como régimen centralizado.

Las fuentes de la energía renovable son la bioenergía que toda aquella que proviene de la biomasa; la energía solar que puede ser la global o directa para algunas tecnologías en específico; la energía geotérmica que proviene del interior de la tierra; la energía hidráulica proveniente de la energía potencial o cinética de las fuentes hidrológicas; la energía oceánica que es la que aprovecha la energía potencial, cinético, térmico o química del agua de mar; y, la energía eólica, que aprovecha la energía cinética del aire. Para cada uno de estos recursos se han desarrollado diversas tecnologías que pueden aprovecharlas y aunque algunas se encuentran aún en desarrollo a nivel de laboratorio, otras ya son altamente atractivas por el nivel de fiabilidad que tienen. La energía que proporcionan estas tecnologías por su propia naturaleza presenta ciertos retos relacionados con lo impredecible y variable en las escalas temporales, sin embargo, en los últimos años se ha buscado enfocarse en

el desarrollo de tecnologías complementarias para superar estos inconvenientes como son las baterías, almacenamientos térmicos o almacenamiento de energía potencial [3].

**Total Renewable Power Generation Capacity, 2011-2017**

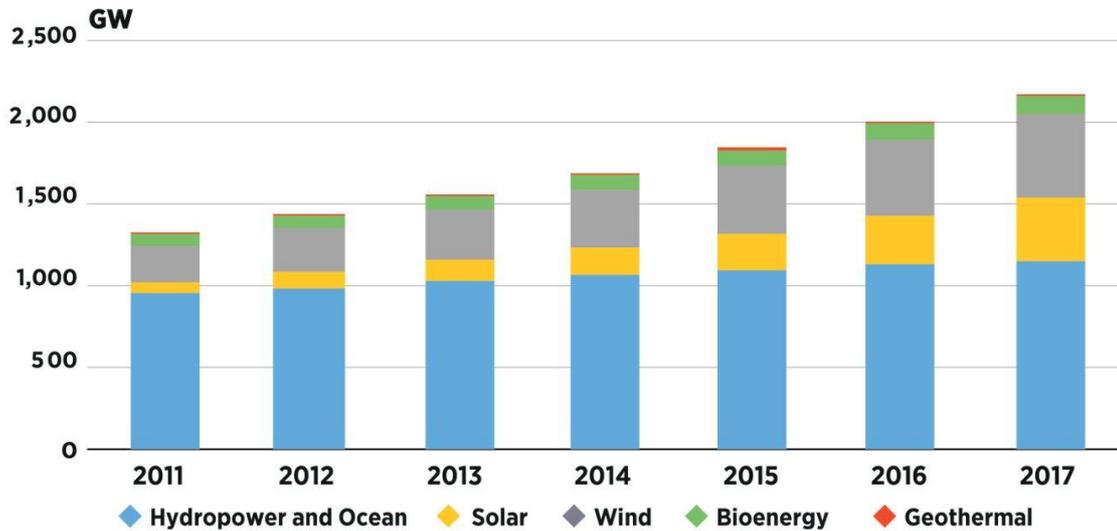
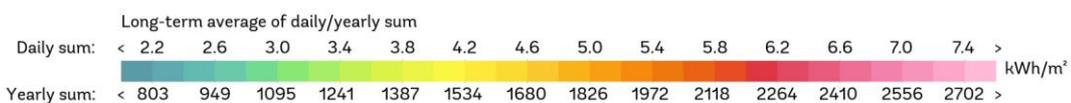
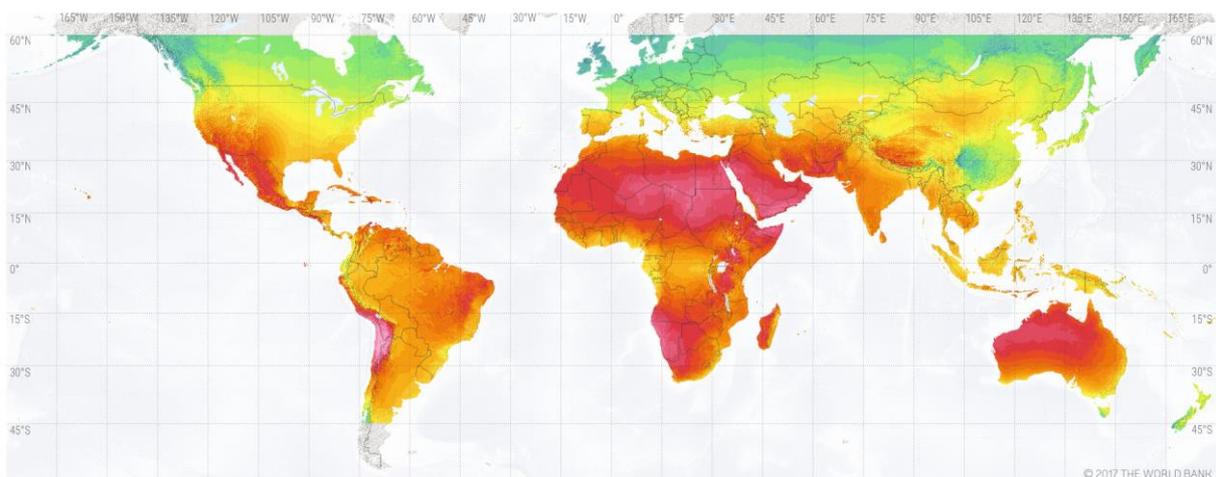


Figura 1-2. Capacidad total de generación de energía renovable. [4]

Considerando la relevancia de las energías renovables para el alcance de nuestros objetivos como sociedad y asegurar nuestro futuro próximo; este trabajo de fin de máster busca describir el comportamiento térmico de una tecnología que permita el aprovechamiento de la energía solar térmica, recurso limpio y gratuito, para su aplicación en la industria del secado de alimentos como una oportunidad para el desarrollo descentralizado y sostenible.

**SOLAR RESOURCE MAP  
GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION**



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

Figura 1-3. Mapa mundial de la radiación global horizontal [5]

## 1.2 Radiación Solar

El sol es nuestra principal fuente de energía y de la cual derivan el resto. Es un cuerpo casi esférico ubicado a  $1.5 \times 10^{11}$  m de la tierra. En el sol la reacción de fusión se da constantemente, como si fuera un reactor nuclear, por lo cual se encuentra a una elevada temperatura, alrededor de los 40000000 K en su núcleo, generando que parte de su energía se disipe en forma de radiación. La energía proveniente del sol llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas después de atravesar la atmósfera y experimentar ciertas interacciones. Siendo esta energía la que permite que exista vida en la Tierra a través del proceso de la fotosíntesis y la mantiene caliente, generando con esto un hábitat de confort para el ser humano y el resto de las especies. A dicha energía solar se le conoce como irradiancia solar total cuando llega a la atmósfera terrestre y tiene un valor de  $1373 \text{ W/m}^2$ , siendo el valor que llega a una superficie perpendicular a los rayos del sol en la atmósfera exterior a una distancia media al sol. Con esta energía se puede tener una aproximación de la temperatura superficial efectiva del sol que es de 5780 K, tratando al sol como un cuerpo negro a esa temperatura.

Las ondas electromagnéticas tienen las mismas características, sin embargo, estas tienen distintas longitudes de onda lo que ocasiona que se comporten de manera distinta. La radiación electromagnética comprende longitudes de onda que van desde menos de  $10^{-10} \mu\text{m}$  para los rayos cósmicos hasta  $10^{10} \mu\text{m}$  las ondas de energía eléctrica. Las ondas electromagnéticas de longitud de onda corta tienen una alta frecuencia, mientras que las de grandes longitudes de onda presentan una baja frecuencia, por lo que las primeras traen mayor energía a comparación de las segundas. El sol emite longitudes de onda que van desde  $0.25\text{-}0.3 \mu\text{m}$  hasta  $2.5\text{-}3.0 \mu\text{m}$  abarcando la luz ultravioleta, la luz visible y la luz infrarroja; esta se conoce como radiación solar y casi la mitad de la radiación solar es luz visible. Además, la radiación térmica es la más pertinente para el estudio de la transferencia de calor ya que es emitida por las moléculas, átomos y electrones de una sustancia y abarca desde  $0.1$  hasta los  $100 \mu\text{m}$ ; por lo que toda materia cuya temperatura esté por encima del cero absoluto emitirá radiación térmica (ya también absorberá). La radiación ultravioleta de longitud de onda corta es peligrosa por ser capaz de matar microorganismos y causar daños a los humanos y otros organismos. La radiación de luz visible está formada por bandas angostas de color que activa la sensación de visión. La luz infrarroja es aquella emitida por los cuerpos cuando se encuentran a temperatura ambiente.

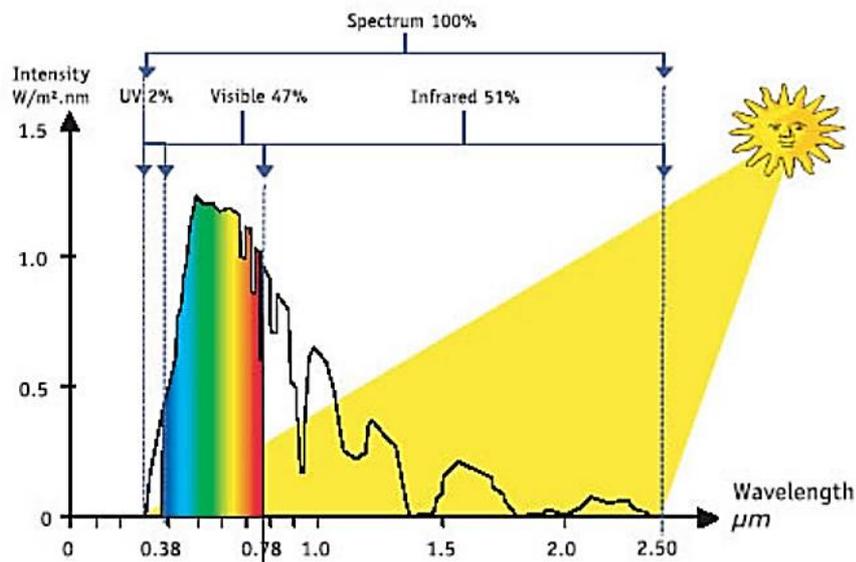


Figura 1-4. Espectro de las ondas electromagnéticas provenientes del sol. [6]

Existen diversos mecanismos que ocasionan que la radiación solar se vaya atenuando cuando atraviesa la atmósfera por la absorción y dispersión. Los gases de Ozono, por ejemplo, tienden a tener una alta absorción de la radiación ultravioleta, algo muy conveniente para las especies de la tierra ya que es peligrosa nuestra sobreexposición a esta. Por otro lado, también absorbe parte del rango visible de las ondas electromagnéticas, mientras que para la parte infrarroja el vapor de agua y el bióxido de carbono juegan un rol más activo en la

absorción. Otro resultado de la dispersión o reflexión de los rayos del solar son los colores característicos del cielo, relacionado con el comportamiento óptico de los rayos al atravesar una capa más delgada o gruesa de la atmósfera dependiendo de la hora del día.

Como resultado de todas estas interacciones la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre es alrededor de  $950 \text{ W/m}^2$ .

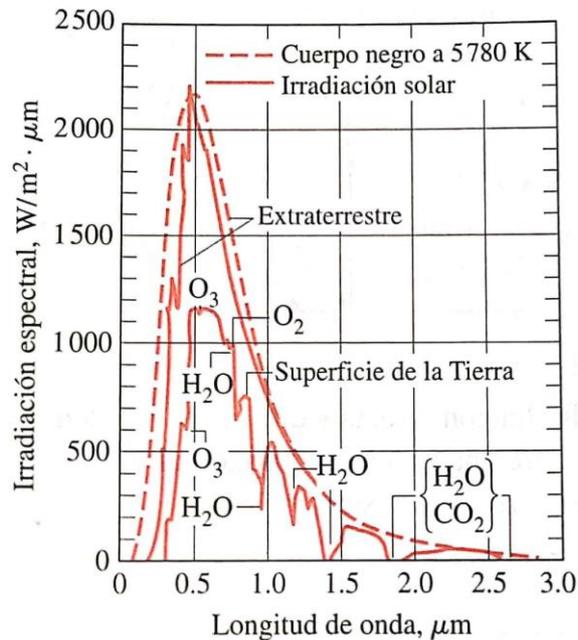


Figura 1-5. Distribución espectral de la radiación solar fuera de la atmósfera y en la superficie de la tierra en comparación con la radiación de un cuerpo negro a la temperatura del sol. [7]

La energía solar está conformada por dos partes, la radiación solar directa  $G_D$ , aquella que no ha sido dispersada o absorbida en la atmósfera, mientras que aquella que ha sido dispersada llegará de todas direcciones y se conoce como la radiación solar difusa  $G_d$ .

$$G_{solar} = G_D \cdot \cos \theta + G_d \quad (1-1)$$

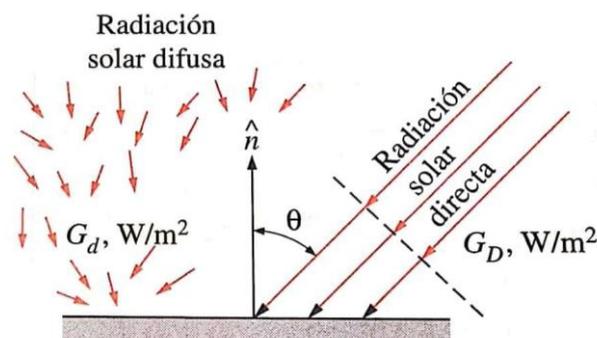


Figura 1-6. Radiación directa y difusa que inciden en una superficie horizontal. [7]

Además, la energía solar que llega a la tierra está relacionada con la posición del sol en el cielo y las coordenadas sobre la tierra con respecto a una superficie con relaciones trigonométricas; ya que estas relaciones variarán en el tiempo. Este tema durante años ha sido un reto para el lector ya que mucha bibliografía describe dichas

relaciones para el hemisferio norte por ser de donde provenía la mayoría de los estudios. Existen algunos ángulos que permiten obtener dichas correspondencias.

$\phi$  Latitud: La ubicación angular al norte o al sur del Ecuador  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

$\delta$  Declinación: la posición angular del sol al medio día solar con respecto al plano del Ecuador; norte positivo  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

$\beta$  Inclinación: el ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ . ( $\beta > 90^\circ$  significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo)

$\gamma$  Ángulo de superficie azimut: la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local con cero hacia el sur, este negativo y oeste positivo;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$

$\omega$  Ángulo horario: el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local. Debido a la rotación de la tierra sobre su eje a  $15^\circ$  por hora: mañana negativa, tarde positiva.

$\theta$  Ángulo de incidencia: el ángulo entre la radiación directa en la superficie y la normal de la superficie.

Por lo tanto, para la posición del sol se tiene que:

$\theta_s$  Ángulo cenital: Es el ángulo de incidencia de radiación de haz sobre una superficie horizontal

$\alpha_s$  Ángulo de altitud solar: el ángulo entre la horizontal y la línea hacia el sol, el complemento del ángulo cenital

$\gamma_s$  Ángulo de azimut solar: el desplazamiento angular desde el sur de la proyección del haz en el plano horizontal, Desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

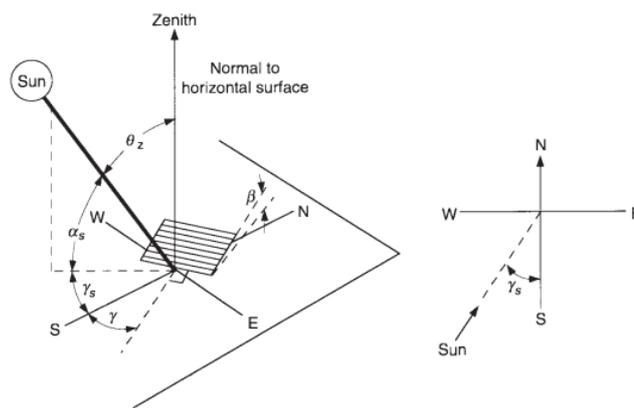


Figura 1-7. Ángulos relacionados con la posición solar para el hemisferio norte. [8]

### 1.2.1 Absortividad, transmisividad y reflectividad

Asimismo, parte de la radiación que llega a un cuerpo puede reflejarse, absorberse y transmitirse. Determinar estos componentes puede llegar a ser completo porque depende de diversos factores como las condiciones de la superficie, tanto la superior como la inferior, la longitud de la onda de radiación que llega, la composición y grosor del medio que atraviesa. La absortividad, transmisividad y reflectividad son propiedades determinadas por la fracción de la radiación que llega a una superficie que ha sido absorbida, transmitida y reflejada, respectivamente. La suma de las propiedades de una superficie es equivalente a 1 en un medio semitransparente; mientras que el caso de que el medio es opaco la transmisividad es igual a 0 por lo que la suma de la absortividad y la reflectividad es igual a 1.

Cabe mencionar, además, gracias a la absorción y reflexión de una superficie es que el ojo humano es capaz de percibir los colores. [9]

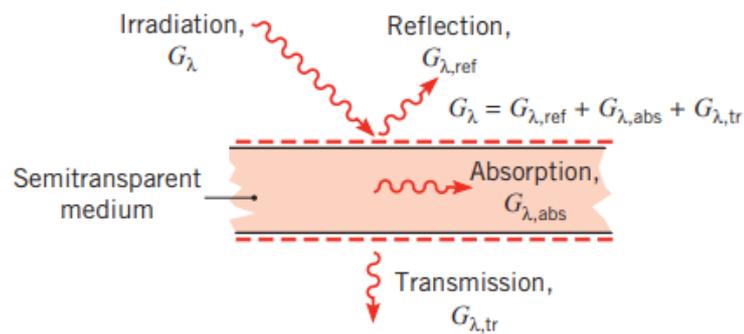


Figura 1-8. Procesos de absorción, reflexión y transmisión espectral asociados con un medio semitransparente. [9]

### 1.2.2 Año típico meteorológico

El año típico meteorológico es una herramienta de análisis que permite realizar un análisis de viabilidad técnico-económica de las tecnologías solares. Este consiste en datos horarios representativos de un año para un lugar específico; en base a datos históricos de al menos 10 años. Los modelos TMY2 y TMY3 son hoy en día los más empleados se identifican el mes típico del año empleando la Norma Internacional ISO 15927-4 empleando los factores de temperatura del aire, irradiancia global horizontal y humedad relativa.

### 1.2.3 Efecto Invernadero

El efecto invernadero aparece cuando la radiación solar atraviesa un material semitransparente como lo puede ser el vidrio u otros, ya que este material permite que las ondas con longitudes entre los  $0.3 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m}$  que representa el 90% de la radiación solar pasen; sin embargo, para longitudes de onda mayores, se comporta como un material opaco. Por ejemplo, cuando un auto se deja al aire libre, el vidrio permite que gran parte de la radiación ingrese, pero no deja que se escape la radiación infrarroja que emiten los materiales en su interior; generando que haya una elevación de temperatura en el interior del auto.

## 1.3 Energía Solar Térmica

La energía solar representa la fuente de energía más antigua que se haya utilizado y tal vez sea el principal motivo por el cual muchas civilizaciones antiguas consideraban al sol como un dios poderoso. Si bien la energía solar puede ser aprovechada de distintas maneras, en este trabajo de fin de máster nos enfocaremos en el aprovechamiento de dicha energía para la generación de calor.

Se sabe que la primera aplicación fue empleada para el secado de alimentos con fines de conservación, sin embargo, durante muchos años se discutió, y posteriormente se aceptó, sobre la aplicación de energía solar concentrada para la quema de la flota romana en la bahía de Siracusa por el filósofo y matemático griego Arquímedes (287-212 a.C.) por cuestionamientos a sus conocimientos sobre óptica en la época.

Es así como la concentración solar ha sido empleada para las primeras aplicaciones, en el siglo XVIII los hornos solares para fundir hierro, vidrios, espejos fue muy empleado en Europa y el medio oriente. El químico Lavoisier por 1774 empleó la concentración alcanzando temperaturas de  $1750^\circ\text{C}$  empleando dos lentes para alcanzar mayores concentraciones. [10]

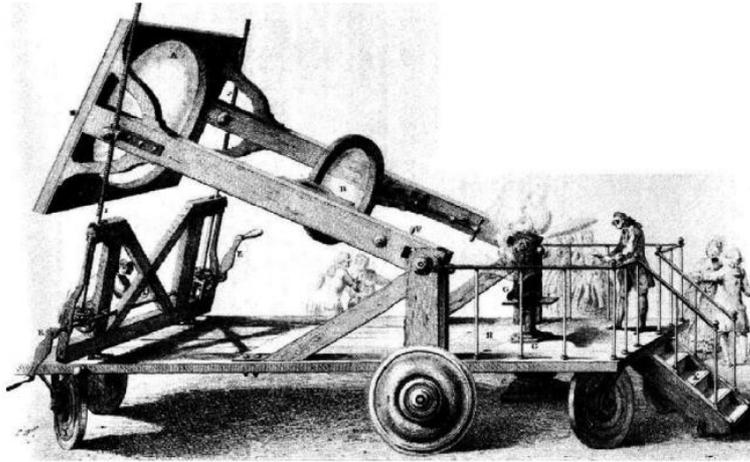


Figura 1-9. Horno solar empleado por Lavoisier. [10]

### 1.3.1 Aplicaciones

La energía solar térmica permite cubrir la demanda de energía térmica y se pueden clasificar de diferentes formas. A nivel doméstico, generalmente, se emplea para el calentamiento de agua, calefacción o refrigeración, mientras que a nivel industrial puede ser empleado para cualquier industria que requiera energía térmica como el secado, cocción, esterilización o a gran escala para la generación eléctrica.

Generalmente, un sistema de energía solar térmica puede estar conformado por los siguientes subsistemas

- Captación solar: En donde se recibe la energía solar para posteriormente entregar en energía térmica a través de un fluido caloportador. Dependiendo del tipo de aplicación pueden emplearse captadores solares como lo son los de sin cubierta de vidrio, placa plana y tubos de vacío, para entregar el calor a un fluido caloportador como aire, agua o fluido térmico. Por otro lado, para un sistema de concentración solar, es común el empleo espejos u otros materiales altamente reflectivos que permitan dirigir el reflejo de los rayos del sol a un foco puntual o lineal.

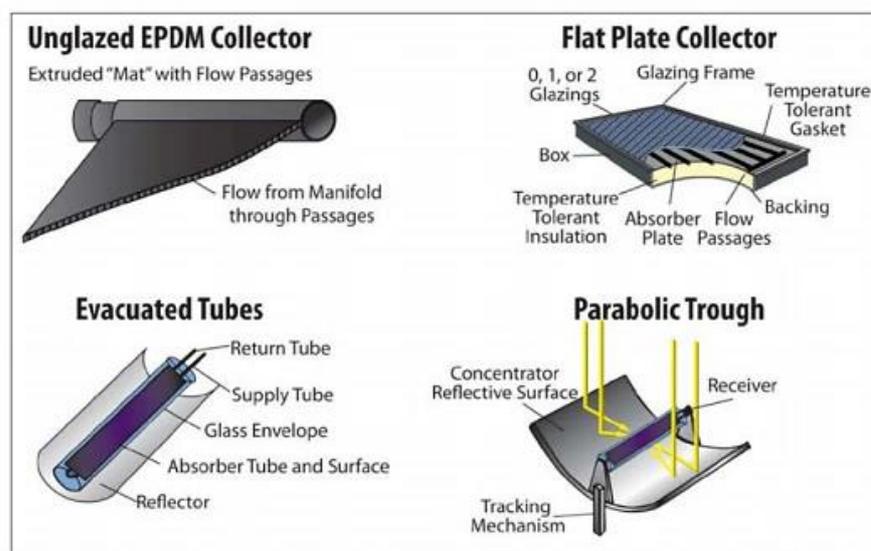


Figura 1-10. Captadores solares. [11]

- Almacenamiento: Debido a que la demanda energética no es constante, es común emplear un sistema para el almacenamiento de energía en forma de calor sensible o calor latente para su posterior uso. El almacenamiento puede ser del fluido caloportador que posteriormente se emplee directamente o podría ser necesario requerir de un intercambiador de calor que permita transferir el fluido calor a otro fluido para su posterior almacenamiento. En los últimos años, el almacenamiento de energía en forma térmica ha sido uno de los mayores atractivos de este recurso energético lo que ha generado un mayor desarrollo en el campo.
- Transporte: Está conformado por las tuberías por donde se lleva el fluido caloportador por lo cual deben estar correctamente aisladas y contar con los equipos necesarios para el correcto funcionamiento como bombas para impulsar el fluido lo que se conoce como circulación forzada o arreglos de tuberías para el empleo del efecto de termosifón, lo que se conoce como circulación natural; vaso de expansión para absorber las variaciones de volumen del fluido por dilataciones térmicas evitando que se generen rupturas en las uniones de la red de transporte.
  - Circuito primario: se conoce así al circuito cerrado que va del captador al acumulador, por donde circula el fluido caloportador. Si hay necesidad de recalentarse es necesario que vuelva a los captadores
  - Circuito secundario: Cuando se emplea un intercambiador de calor el fluido caloportador que se emplea para el consumo se encuentra en un sistema abierto que se inicia desde el suministro hasta el punto de consumo pasando por el intercambiador de calor para el aumento de temperatura.
- Auxiliar: Debido a que la energía solar térmica puede ser muy variable se suele emplear un sistema auxiliar que aporte energía para cubrir la demanda energética requerida. Se pueden emplear otros sistemas que produzcan energía térmica como la biomasa o energía eléctrica.
- Control: Encargado del funcionamiento correcto del sistema a partir de la demanda y producción energética acciona los equipos.

#### 1.3.1.1 Producción de Agua caliente sanitaria (ACS)

Después de los paneles fotovoltaicos las termas solares representan la tecnología más conocida que aprovechan la energía solar. Los sistemas de producción de agua caliente sanitaria que emplean colectores solares pueden implementarse en distintas configuraciones que se explican revisando la Figura 1-9. Como se ve en la configuración a) para instalaciones domésticas en lugares no tan fríos se suele emplear el efecto termosifón por lo cual se emplea un tanque de acumulación elevado por encima del colector siendo el agua el fluido caloportador. Es posible mejorar el arreglo al emplear un sistema de control para activar el sistema de impulsión, por lo que es necesario también integrar una bomba; y un sistema auxiliar de calentamiento permitirá tener una temperatura de consumo fija, como se aprecia en la configuración b). Cuando el sistema se encuentra ubicado en lugares muy fríos es posible que el agua llegue al congelamiento por lo cual es necesario emplear otro fluido con anticongelante que circule por el colector y que calentará el agua posteriormente con el empleo de un intercambiador que se encuentra en el interior del tanque de acumulación, configuración c). Finalmente, el intercambiador empleado para casos de posible congelamiento puede también colocarse en el exterior requiriendo una segunda bomba, configuración d).

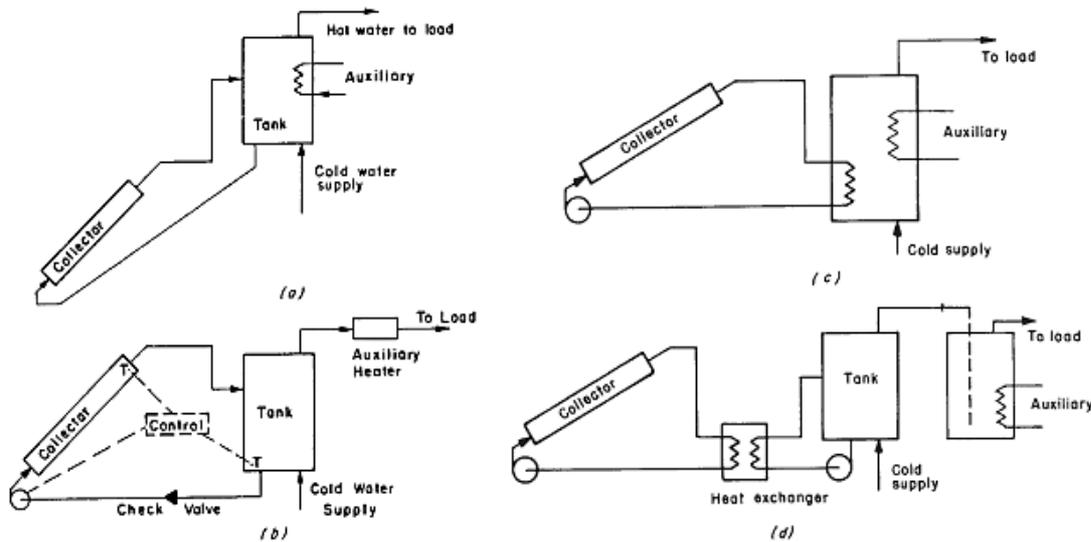


Figura 1-11. Configuración para agua caliente sanitaria. [8]

El empleo de agua caliente sanitaria es muy común en las viviendas, sin embargo, su empleo en hospitales u hoteles es altamente atractivo por el requerimiento de agua caliente para diferentes procesos.

### 1.3.1.2 Climatización de piscinas

Un nuevo mercado se ha abierto con el empleo de captadores solares para la climatización de piscinas, esto se debe a lo bajo de la temperatura de trabajo para la climatización que se encuentra alrededor de los  $30^{\circ}\text{C}$  lo que permite que el sistema opere con una alta eficiencia. Por otro lado, la demanda energética coincide con la generación de energía permitiendo arreglos que no requieran el uso de sistemas auxiliares ni tanques acumuladores, ya que es la propia piscina la que cumple esa función. Además, se han desarrollado colectores simples, resistentes y flexibles para esta aplicación.

### 1.3.1.3 Calefacción

Para la calefacción se tienen los sistemas activos que suele emplear sistemas similares a los de calentamiento de agua colocando unidades terminales como radiadores para calentar los ambientes. Es también común el empleo del aire como fluido caloportador para esta aplicación agregándose la opción del empleo del aire como fluido caloportador por presentar ciertas ventajas como eliminar los problemas de congelamiento, ebullición y de corrosión. Además, el tanque de almacenamiento suele contener piedras de río para almacenar el calor que trae el aire y se emplean ventiladores para la impulsión del fluido. Sin embargo, el mayor reto que se presenta para esta aplicación es el inconveniente de que la mayor demanda de calefacción se da cuando menor recurso se tiene generando así la adopción de acumuladores y sistemas auxiliares.

Otro son los sistemas pasivos que suelen calentar los ambientes aprovechando una ganancia solar directa, es decir el efecto invernadero para elevar la temperatura. Se suelen emplear tecnologías como los muros trombes, invernaderos adosados o claraboyas para directamente calentar el ambiente o puede emplearse el aire como fluido caloportador y hacerlo ingresar al espacio deseado.

### 1.3.1.4 Refrigeración

La ventaja de la refrigeración empleando energía solar térmica es que la demanda de esta es mayor cuando mayor es el nivel de radiación. Dentro de las diversas tecnologías para procesos de refrigeración solar empleando sistemas térmicos se encuentran los de ciclos cerrado que emplean los sistemas de absorción, adsorción y sistemas desecantes de aire para sistemas de baja temperatura y los sistemas termomecánicos para alta temperatura. El sistema termomecánico está conformado por un evaporador, un compresor, un condensador y una válvula de expansión y que permite evacuar el calor; el sistema de absorción reemplaza el compresor por

un arreglo que permite la retención empleando una sustancia de las moléculas en estado líquido o gaseoso de otra; la adsorción, que es la adhesión de gas o líquido sobre la superficie porosa de un material sólido y desecante que combina la deshumidificación y la refrigeración evaporativa.

### 1.3.1.5 Desalinización

Una de las aplicaciones más antiguas es la de la desalinización que consiste en emplear una base negra donde se coloca el agua salada y una cubierta con alta transmisividad para dejar pasar los rayos del sol y generar el efecto invernadero. La forma de la cubierta permite que se genere una condensación del agua evaporada y una posterior recolección, dejando en la base la salmuera.

### 1.3.1.6 Procesos industriales

Las tecnologías anteriormente comentadas pueden ser empleadas directamente para usos industriales y también, si se requiere más altas temperaturas, combinar su uso con tecnologías de concentración. Entre los procesos de uso industrial se encuentran la generación de vapor, el vado, el secado, la esterilización, la pasteurización, el calentamiento de baños líquidos, tintado, tratamientos químicos, secado, etc.

### 1.3.1.7 Concentración solar

Como se ha mencionado anteriormente, en la industria se puede requerir trabajar con altas temperaturas para lo cual es necesario migrar al campo de la concentración solar. La tecnología de concentración puede ser empleada para obtener elevadas temperaturas para procesos industriales o bien para su empleo en la generación eléctrica. La concentración solar se caracteriza por emplear un material altamente reflectivo para reflejar los rayos del sol a un foco que puede ser puntual o lineal, dependiendo de la tecnología.

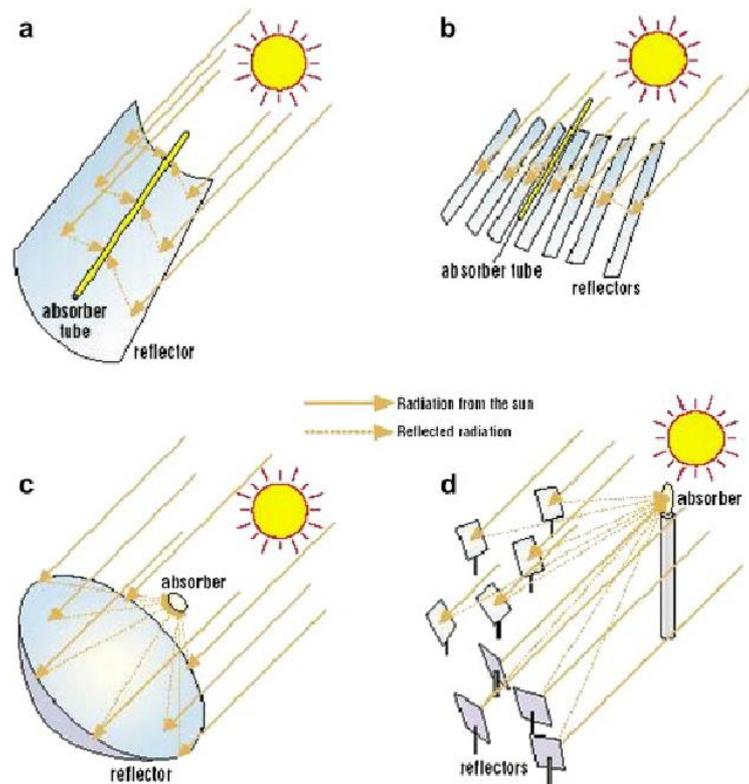


Figura 1-12. Tipos de concentradores; a) Concentrador Parabólico lineal, b) Fresnel, c) disco parabólico d) de torre. [12]

### 1.3.2 Secado solar

Se debe considerar que, en algunos lugares rurales del mundo, aún no existe acceso a electricidad o esta es esporádica; además, las tecnologías que emplean combustibles fósiles pueden tener un costo elevado para los agricultores. En cambio, el empleo de la energía solar para el proceso de secado se ha empleado para la conservación de los alimentos por muchos años de forma descentralizada. Sin embargo, el método tradicional de secado al sol (una cama del producto expuesta directamente al sol y al viento) tiene ciertas limitaciones como la pérdida de cultivo por emplear un procedimiento inadecuado que permite la presencia de hongos, el ataque de insectos u otros animales y los propios riesgos de tener un producto expuesto a la intemperie, como suele ser el proceso tradicional de colocar los productos en el suelo para que se vayan secando. El proceso de secado con productos al aire libre suele verse también afectado por la naturaleza del clima, si la humedad relativa del aire ambiente es alta, existirá una máxima capacidad para que este pueda absorber la humedad proveniente de la evaporación; motivo por el que en los trópicos con climas cálidos y húmedos sea menos efectivo ese proceso.

Si bien el método tradicional de secado al sol se encuentra arraigado por ser la forma en la que han venido trabajando la mayoría de agricultores hoy en día es necesario mirar la demanda de productos secos con procesos inocuos. Para fomentar la introducción del secado solar en lugar de al sol, es necesario entender los principales inconvenientes como la alta inversión inicial; técnicos y emprendedores con bajas capacidades técnicas para empleo de una tecnología más elaborada; el cambio que conlleva pasar de un proceso a otro; y, los incentivos que conlleven el obtener un producto de mejor calidad para el mercado. Además, existen otros retos más relacionados con el propio diseño para poder competir directamente de tecnologías de secado convencional como términos de capacidad, producto final obtenido, costos y rentabilidad; así mismo considerar un sistema extra de *backup* para los meses críticos. Sin embargo, no todo es negativo para la tecnología de secado solar ya que este permite obtener una mayor temperatura de trabajo, circulación del aire, baja humedad relativa; aumento de ratio de secado; ofrece mayor protección al polvo, insectos y animales mayores; a mayor temperatura se disuaden a los insectos y a velocidades de secado más rápidas reducen el riesgo de deterioro por microorganismos; aumentar la ratio de secado de alimentos permite un área de secado más pequeña; no hay necesidad de mover los alimentos cuando llueve; la tecnología puede desarrollarse con materiales del lugar y, finalmente, cuanto más completo sea el secado se logrará un almacenamiento más prolongado. [13]

Durante el secado al sol, el calor es transferido por convección al aire que se encuentra circulando alrededor del producto y la absorción de la radiación solar directa y difusa sobre el producto expuesto al sol. El calor luego viaja hacia el interior del producto lo que permite un aumento de la temperatura del producto, logrando así realizar la migración del agua y del vapor desde el interior hacia fuera. Además, otra parte de la energía se usa para la evaporación del agua en la superficie del producto y el resto se pierde por convección y radiación. Las fuerzas del viento permiten eliminar el agua evaporada del entorno por convección natural. El proceso anteriormente mencionado se repite hasta que la presión de vapor de la humedad contenida en el producto es igual al de la atmósfera. Por lo tanto, la tasa de desorción de humedad del producto al medio ambiente y la absorción del medio ambiente están en equilibrio. Cuando se trabaja con un secado al sol el proceso de secado es lento y cuando el ambiente tenga una alta humedad relativa, el contenido de humedad de equilibrio es bajo para un almacenamiento seguro. [13]

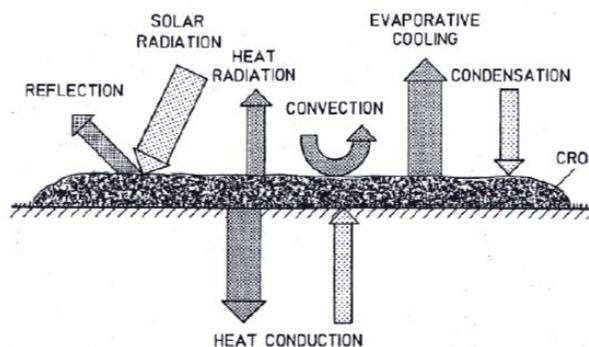


Figura 1-13. Flujo de calor del secado al sol [13]

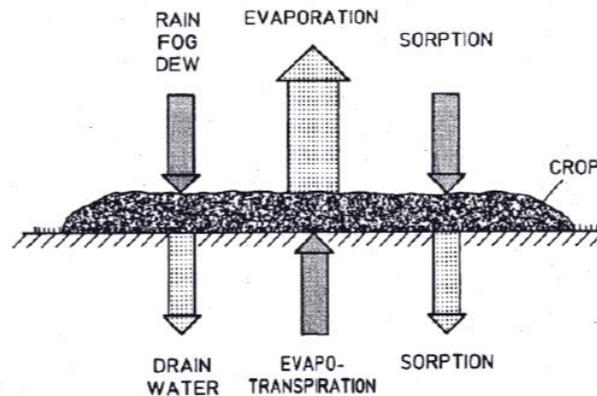


Figura 1-14. Flujo de masa del secado al sol [13]

El objetivo principal de entregar más calor del que se encuentra disponible en el ambiente, es lograr aumentar la presión de vapor contenido en el producto y disminuir la humedad relativa del aire que pasa por el producto, para lograr aumentar su capacidad de absorber y transportar la humedad. Un sistema de secado solar requiere hacer circular el aire que se calienta al pasar a través de un colector solar; posteriormente este se enfría a medida que va captando la humedad contenida en el producto; y al mismo tiempo el producto también va aumentando su temperatura directamente por el sol. El aire caliente tiene mayor capacidad de retener humedad tanto por la temperatura que alcanza en el colector, así como también por la humedad absoluta propia del aire cuando ingresa. A continuación, se puede observar la influencia de elevar la temperatura de un aire a 20°C con diferentes humedades relativas para identificar el impacto en el aumento de la capacidad de absorción de la humedad [13].

Initial relative humidity	Moisture absorption capability (grams of water per m <sup>3</sup> of air [g/m <sup>3</sup> ])		
	Not heated	Heated to 40 °C	Heated to 60 °C
40 %	4,3	9,2	16,3
60 %	1,4	8,2	15,6
80 %	0	7,1	14,9

Figura 1-15. Proceso de secado para un aire que ingresa a 20°C y sale con un 80% de humedad relativa [13]

Para el proceso de secado se requiere reducir el contenido de humedad de un producto a un valor mínimo para asegurar un seguro almacenaje. El contenido de humedad se puede medir en base húmeda y en base seca. En base húmeda se entiende como la proporción entre la masa de agua y la masa total; mientras que en base seca se entiende como la proporción de la masa de agua y la masa del producto seco. Considerando entonces la cantidad de agua que se debe eliminar y la capacidad de absorción del aire calentado a cierta temperatura se puede calcular la cantidad de aire requerido. Por ejemplo, para reducir el contenido de humedad de 24% a 14% de una tonelada de arroz, se deben eliminar 100kg de agua, por lo que, se requiere 12500 m<sup>3</sup> de aire con una capacidad de absorción de 8g/m<sup>3</sup>. [13]

Es así interesante, cómo para procesos de secado puede existir la posibilidad de no requerir calor extra ya que el propio aire proveniente del ambiente puede ceder parte de su energía interna para vaporizar el agua; sin embargo, en general el calor requerido para evaporar el agua es de 2.26 kJ/kg. Es así que el calor entonces es útil por dos razones, si se aumenta el calor del aire se reduce la cantidad requerida por aumentar su capacidad de absorción y la temperatura en los granos, por el aire y la radiación directa, permite facilitar el transporte de la humedad del centro del producto hacia la superficie. [13]

Básicamente, el secado solar emplea la energía solar para generar una fuente de calor que puede ser la única o complementaria; este caso puede calentar previamente un fluido, que es el aire, para inyectarlo a través del producto por circulación natural o forzada, puede calentar directamente el producto expuesto a la radiación o puede ser una combinación de ambos. Cada producto presentará un comportamiento distinto relacionada a la tasa de evaporación en su superficie que permitirá que el secado se dé de manera rápida o lenta. Si el producto alcanza en su superficie temperaturas muy altas puede ocasionar la formación de una capa externa que impedirá seguir evaporando el agua contenido en su interior, esto generalmente se da cuando la velocidad de secado es muy rápida. Además, dependiendo del producto, altas temperaturas pueden degradar los nutrientes, el color u otras características importantes por lo que se debe asegurar una temperatura máxima de funcionamiento.

La clasificación de los sistemas de secado solar está vinculada al modo de calentamiento y el empleo de dicho calor, dividiéndose en sistemas pasivos y sistemas activos, el último emplea circulación forzada principalmente. Existen además tres subclases para la primera clasificación la del tipo integral, tipo distribuido y tipo mixto. [13]

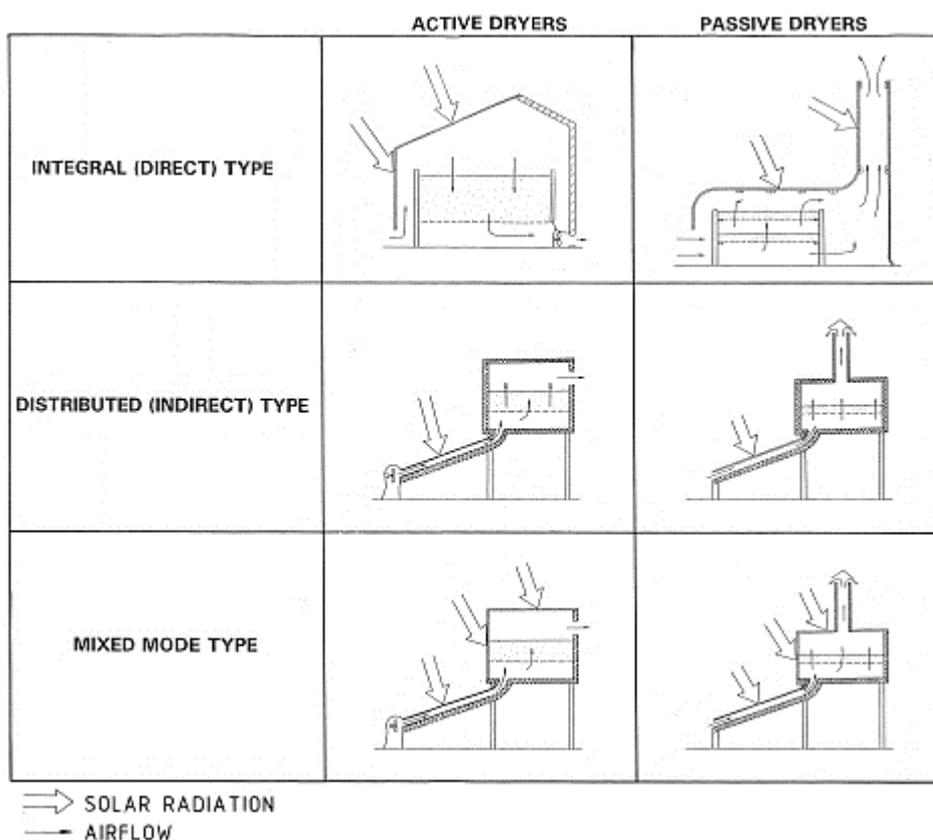


Figura 1-16. Secadores solares típicos. [14]

Debido al calentamiento y la absorción de vapor el aire presenta una disminución de su peso específico generanco así la convección natural. La diferencia de peso específico entr el aire del secado y el aire del medio ambiente crea un flujo de aire de forma vertical. La convección natural trae ciertas ventajas como el poder funcionar sin necesidad de una fuente de electricidad, sin embargo, también presenta ciertos inconvenientes como no contar con la suficiente potencia para atravesar una cama grande de producto por la pérdida de carga que genera, así como la imposibilidad de usarlo para condiciones climáticas complicadas o durante la noche.

Por otro lado, si el producto se encuentra expuesto directamente o indirectamente al sol influye en la propia transferencia de calor. En el caso de que se tenga un sistema directo el producto funcionara como una superficie absorbente. Por lo que para tener un contenido de humedad homogéneo es necesario voltear frecuentemente el producto y extenderlo en un área de superficie máxima en capas delgadas. Sin embargo, hay ciertos productos que pueden verse afectados por esta exposición directa al sol haciendo que la clorofila se descomponga. Por lo tanto, para un secado directo es necesario tener grandes áreas de superficie de suelo. [13]

Los secadores solares pueden emplearse con diferentes frutas, vegetales, hierbas, etc, sin embargo, para un correcto proceso de secado no sólo se debe verificar la cantidad de humedad a extraerse por producto sino también otros parámetros como llegar a un contenido de humedad bajo y uniforme, proporción mínima de granos rotos y dañados, baja susceptibilidad a la rotura posterior, alta viabilidad, bajo conteo de moho, alto valor nutritivo y aceptabilidad del consumidor de la apariencia y propiedades organolépticas. Es así como dentro de los aspectos no técnicos a considerarse para la apropiación de la tecnología está el acceso del productor al mercado y conocimiento de las especificaciones de los clientes. Así mismo, otros parámetros son importantes para el proceso de secado como el producto que se coloque, el tamaño y forma del mismo, el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad final, densidad aparente, espesor de la capa, pretratamiento mecánico o químico, intervalo de volteado de producto, temperatura del grano, temperatura y humedad del aire en contacto con el grano y la velocidad del aire en contacto con el grano.

### 1.3.2.1 Sistemas Pasivos

#### 1.3.2.1.1 Secado al sol

El producto se expone directamente al sol y a las corrientes de aire naturales en alguna superficie ya sea en el suelo, estantes horizontales o el techo de una vivienda. Es necesario voltear de vez en cuando el producto para fomentar que mayor parte de la superficie pueda estar expuesta. La principal ventaja de este método es el bajo coste de capital y funcionamiento, pero el producto queda a la intemperie y con eso expuesto a problemas concernientes a la inocuidad del producto.

#### 1.3.2.1.2 Secado con circulación natural

Estos sistemas dependen completamente del sol para su funcionamiento, es decir la circulación del aire depende del uso del efecto termosifón, la presión del viento o ambos. Estos tipos de secadores no requieren de una alta inversión ya que el área en el terreno es más pequeña a comparación de un secado al sol; el producto final es de mejor calidad y presenta menor cantidad de meras, el tiempo de secado se reduce, protección de la intemperie, materiales disponibles en la localidad. Los secadores que corresponden son los de tipo integral, distribuido y mixto.

- **Distribuido:** También conocidos como secadores solares pasivos indirectos. Se caracteriza porque el producto no está directamente expuesto a la radiación solar, sino se encuentra ubicado en una cámara opaca. Este tipo de secadores tienen la ventaja de obtener productos de mejor calidad y pueden alcanzar mayores temperaturas; sin embargo, el aire presenta fluctuaciones de temperatura que impiden mantener las condiciones de operación constantes. Generalmente está conformado por un colector, ductos aislados, cámara de secado aislada y una chimenea para la impulsión del aire.

Generalmente se acepta que los secadores solares distribuidos por convección forzada con un buen diseño son más efectivos y controlables que las de tipo de circulación natural. Por lo que la mayoría de de circulación natural son del tipo mixto. Los sistemas pasivos distribuidos han permitido la mejora de la eficiencia en los calentadores del aire y la circulación de misma, sin embargo, no se ha generado mayor interés en la eficiencia de las propias cámaras de secado. Esto ha generado que algunas de las cámaras generalmente consruidas de madera sean suceptibles a daños concernientes a su exposición a los cambios climatológicos. Las cámaras de secado requieren un debido aislamiento para disminuir las pérdidas de calor y permitir más tiempo de vida de las mismas por lo que se recomienda un revestimiento final de metal o materiales resistententes al agua. [14]

- **Integral:** En este tipo de secadores el producto está directamente expuesto al sol. El calor extrae el contenido de humedad en el producto y a su vez disminuye la humedad relativa del aire aumentando la capacidad de transportar la humedad. Algunos productos se ven favorecidos con la exposición a la luz solar por mejorar sus características visuales y de sabor. A comparación del tipo distribuido, estos son más simples y por lo tanto más económicos de construir; sin embargo, pueden ocasionar sobrecalentamiento localizado en el producto y requerir chimenea para la correcta extracción del aire húmedo. Entre los secadores más conocidos se encuentran el tipo gabinete y el tipo invernadero.

Los secadores de gabinetes solares pasivos presentan como ventaja el bajo coste de construcción y la facilidad de contar con los materiales a nivel local. Sin embargo, se reconoce que no elimina

correctamente el aire húmedo haciendo que las tasas de secado se reduzcan y alcancen altas temperaturas sobrecalentando el producto. Se cuenta con información de que se ha llegado a alcanzar temperaturas por 70°C-100°C que es excesivo para la mayoría de productos. Es así que se debe tomar en cuenta las recomendaciones más importantes para su construcción como entradas de aire más grandes y el empleo de chimeneas solares de bajo costo. [14]

Los secadores de efecto invernadero cuando son construídos apropiadamente facilitan el control del proceso de secado mejor que los tipos gabinete, especialmente para una escala mayor de producto. Generalmente los secadores de tipo invernadero se caracterizan por contar con una carpa de polietileno que puede ser negro en el lado en donde no se llega a recibir los rayos del sol y en el suelo para mejorar la absorción de la radiación. Generalmente, el lado que viene el viento se suele tener la carpa no al raz del suelo sino enrollado para poder variar la altura de entrada del viento para controlar el flujo y al lado extremo se suele colocar rejillas de ventilación para la salida del aire húmedo. [14]

- Mixto: Combina las características de los dos tipos anteriores al parecerse estructuralmente al tipo distribuido pero las paredes de la cámara de secado son un material con alta transmisividad como lo puede ser el vidrio u otro.

Dentro de esta categoría se encuentra el empleo de extractores que emplean el recurso eólico en la parte superior de la chimenea para facilitar la remoción del aire húmedo. Este extractor consiste en un rotor montado en un rodamiento segurar baja fricción, que aprovecha la llegada del viento desde cualquier dirección para generar el movimiento. [14].

	Type	
	Integral	Distributed
Principal modes of heat transfer to crop	Radiation (ie. By direct absorption of solar radiation) and convection (ie. from heated surrounding air).	Convection from pre-heated air in an air-heating solar-energy collector.
Components	Glazed drying chamber and chimney.	Air-heating solar-energy collector, ducting, drying chamber and chimney.
Initial cost	Increasing cost →	
Construction, operation and maintenance	Simplicity in both construction (ie. On-the-site construction) and operation. Requires little maintenance.	Consists of comparatively elaborate structures, thus requires more capital investment in materials and large running costs. More operational difficulties of loading and occasional stirring of the crop (since crops are usually dried in relatively deep layers).
Efficiency	Little information on comparison of performance with distributed-type dryers. Likely to operate at lower efficiencies due to its simplicity and less controllability of drying operations.	Have a tendency to higher efficiency since individual components can be designed to optimal performance.

Figura 1-17. Comparación de secadores solares tipo integral y distribuido por transferencia de calor, costos y eficiencia [14]

### 1.3.2.2 Sistemas Activos

Estos sistemas se diferencian por emplear otros recursos energéticos además de la solar para la calefacción y para accionar los equipos auxiliares como ventiladores; por lo que su circulación es de tipo forzada. Los secadores de sistemas activos son los que han escalado para un secado comercial en combinación con combustibles fósiles, reduciendo el consumo de energía fósil y permitiendo un mejor control de los parámetros de funcionamiento, estos se conocen como “secadores solares híbridos”.

Además, considerando que con este sistema se pueden alcanzar mayores temperaturas, es necesario requerir de altas cantidades de flujo de aire ya que el producto debe contar sólo con una exposición limitada al aire muy caliente. Por dicho motivo, cuando se requiere temperaturas altas es necesario emplear circulación forzada de

aire con ventiladores. [14]

#### 1.3.2.2.1 Integrado

Este tipo no tiene un sistema diferenciado colectores y cámara de secado sino se encuentran integrados en un solo volumen. Estos sistemas se suelen dividir en los secadores tipo de absorción directa, secadores con pared o techo colector y los de tambor absorbedor dentro del invernadero.

En el primer tipo el producto es el que recibe la radiación solar directamente, por lo cual no se requiere el uso de colectores aparte; entre las aplicaciones se encuentra el uso para el secado de madera, graneros solares, entre otros. En el caso de los secadores solares de techo colector o de pared colector, se les suele conocer como tipo almacenamiento ya que facilitan almacenar el calor al contar con muros de hormigón que sirve de colector solar inicialmente. Finalmente, los secadores de invernadero con cámara de absorción interna consisten en una cubierta exterior de tipo invernadero y una cámara de secado interior pintada de negro que sirve de absorbente. [14]

#### 1.3.2.2.2 Distribuido

Las unidades de colector solar y cámara de secado son separadas como en el caso del sistema distribuido pasivo, pero en este caso se emplea un extractor o ventilador para su funcionamiento. Para los secadores solares activos del tipo distribuido, la temperatura máxima permitida puede no necesariamente asegurar un diseño óptimo del secador ya que la eficiencia de los equipos también considera la temperatura a la salida. Es así como, se convierte en una decisión crítica de diseño el empleo de altas temperaturas de aire y las distintas velocidades de flujo que conllevan a la selección de ventiladores y conductos aislados; o emplear temperaturas bajas que minimizan el costo en aislamiento y de pérdidas de calor. La mayoría de los sistemas de secado solar del tipo activo suelen abarcar y mejorar los colectores solares para que disminuyan tanto las pérdidas ópticas como las pérdidas térmicas; sistemas de recirculación de aire para el precalentamiento del aire a la entrada y remoción de aire saturado; y, la ubicación de los ventiladores o extractores dentro del sistema. [14]

#### 1.3.2.2.3 Mixto

De todos los tipos antes mencionados estos son los menos comunes, combinan las características del integrado y el distribuido como los mixtos pasivos, sólo que emplean la circulación forzada.

Aunque los secadores solares de convección forzada o activos son generalmente más efectivos y más controlables a comparación de la convección natural o pasivos, es la necesidad de requerir electricidad u otro tipo de combustible para los ventiladores o como sistema de apoyo para la generación de calor lo que orienta la decisión de seleccionar sistemas pasivos hasta la fecha, especialmente en zonas aisladas y alejadas. Además, los costos de capital, mantenimiento y operativos impidan que los agricultores que trabajan a pequeña escala puedan acceder a estas tecnologías. Es por eso que para aplicaciones de gran escala en sectores rurales el secador tipo invernadero ventilado tiene una ventaja por su bajo costo y simplicidad en construcción como en operación.

### 1.3.3 Estado del arte

Con la finalidad de tener una visión global del desarrollo en el campo de la energía solar, a través del análisis bibliométrico obtenido del artículo “A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field” se concluye en el artículo el crecimiento exponencial en el campo de la energía solar en los últimos años. Se menciona que entre las aplicaciones la deshidratación es de atención por el número de artículos desarrollados (114 artículos) probablemente por la creciente demanda de energía y los problemas medioambientales. El desarrollo en este campo en específico está relacionado con mejorar la eficiencia de los equipos y la reducción de costos. [15]

Así mismo, como se puede apreciar en la siguiente imagen entre las aplicaciones de la energía solar térmica se encuentra el secado en donde el número de publicaciones ha ido en aumento. Entre 1992-1996 se tuvieron 19 publicaciones, entre 1997-2001 se aumentó a 33, entre 2002-2006 se obtuvieron 25 publicaciones y finalmente entre el 2007-2011 se obtuvieron 37 aplicaciones. Se aprecia entonces que a pesar que el tema del secado solar es una de las aplicaciones más antiguas de la energía termosolar con 114 publicaciones entre 1992 y 2011 permanece vigente en nuestro contexto.

Main topics and subtopics	Number of publications (1992–2011)	Number of publications (1992–1996)	Number of publications (1997–2001)	Number of publications (2002–2006)	Number of publications (2007–2011)
Energy applications	1059	73	148	233	605
Hydrogen	321	15	17	65	224
Desalination	192	9	51	42	90
Air conditioning (cooling)	190	7	19	45	119
Drying	114	19	33	25	37
Heat pump	94	8	14	32	40
Biomass (microalgae)	89	13	14	18	44
Water splitting	59	2	0	6	51
Light absorbing material	983	39	81	209	634
Nano material	322	2	12	58	250
TiO <sub>2</sub> /Titanium	191	8	0	50	113
Semi conduct(s)	124	15	17	18	74
Thin film(s)	93	2	12	18	61
Phase change material	77	5	8	30	34
Silicon (Si)	64	2	14	11	37
Zinc oxide (ZnO)	51	0	4	13	34
Fill factor	32	1	6	8	17
Photo (electro) chemistry	29	4	8	3	14
Solar cell(s)	420	19	41	108	252
Solar cell(s)	247	9	34	63	141
Fuel cell(s)	45	3	3	11	28
Dye solar cells	72	0	0	22	50
Photovoltaic cell(s)	31	2	2	7	20
Photo electrochemical cell(s)	25	5	2	5	13
Thermal	394	31	47	92	224
Solar collector	120	9	17	35	59
Heat transfer	74	12	6	11	45
Thermal storage	71	4	7	18	42
Thermal performance	43	1	3	5	34
Geothermal energy	29	5	6	8	10
Solar chimney	29	0	3	8	18
Concentrated solar energy	28	0	5	7	16
Photovoltaic(s)&PV	371	20	31	67	253
Photovoltaic effect	200	12	18	39	131
Photovoltaic (PV) system(s)	106	5	9	20	72
PVT	26	2	0	3	21
Photovoltaic (PV) array(s)	11	0	3	0	8
Organic photovoltaic(s)	10	0	0	2	8
Photovoltaic generator(s)	9	1	0	1	7
Grid connected photovoltaic(s)	9	0	1	2	6

Figura 1-18. El número de publicaciones en diferentes temas y subtemas de la energía solar térmica. [15]

Además, para un mejor entendimiento de la vigencia en la investigación de la energía solar térmica específicamente para el proceso de secado, los secadores solares y el modelamiento térmico de dicha tecnología, se construyó la gráfica de la evolución del número de artículos publicados en dichos temas en la plataforma de información ScienceDirect, que presenta una mayor base de datos. Como se observa en la gráfica siguiente, la aplicación de la energía solar en el proceso de secado presenta un crecimiento de manera exponencial en los últimos años, mientras que los secadores solares y modelamiento de secadores solares representan un menor número, pero con notable crecimiento. Para este año, en noviembre del 2019, los tres tópicos sostienen un aumento a comparación de los años anteriores y ya se cuentan con un número de artículos pertenecientes al próximo año. La tecnología de secadores, así como el modelo de los sistemas térmicos presentan una tendencia en crecimiento que responde a una demanda de productos secos relacionados a diversos factores.

Este crecimiento puede explicarse como se menciona en el “A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field” a la creciente demanda de energía y los problemas medioambientales que orientan a migrar a fuentes energéticas alternas como la energía solar; sin embargo, hay que reconocer que el secado empleando la energía solar ha sido un método de conservación empleado desde hace varios años. Entonces hay que identificar nuevos factores que hayan generado este aumento en cuanto a las investigaciones en el mundo académico. Un factor a reconocer es la propia globalización, es decir, hoy en día una cocina de nivel local puede viajar por el mundo para mostrar parte de su identidad cultural, por lo que en el siglo XX el desarrollo de la producción, el procesamiento, conservación y distribución de los productos alimenticios ha permitido preparar un plato conocido en un pueblo en otras ciudades, países o regiones del mundo. Este concepto también ha sido estudiado por el antropólogo británico Jack Goody como “la industrialización de la cocina” lo que ha generado cambios en los hábitos alimenticios a nivel mundial [16]. Es así que, si bien el proceso de secado para la conservación de alimentos con la energía solar es un método antiguo, existe hoy en día ciertos requerimientos en cuanto a los procedimientos empleados y a la calidad de los productos finales que son comercializados a nivel mundial.

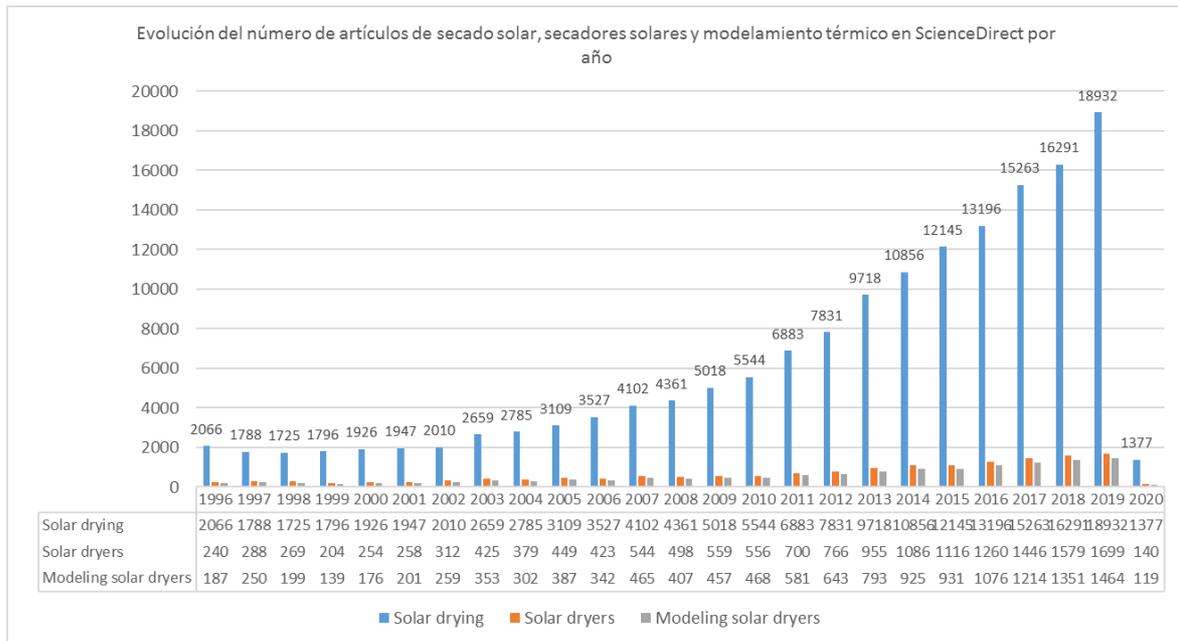


Figura 1-19. Evolución del número de artículos científicos publicados a través de Science Direct sobre el secado solar, secadores solares y el modelamiento de dicha tecnología.

Además, esta transformación social, concerniente a la globalización, ha permitido y también fomentado la evolución de procesos de conservación para la exportación de diferentes de productos para cubrir la demanda de una gastronomía globalizada ya que brinda ciertas ventajas como disminución de mermas, mejora los tiempos de conservación, disminuye los costos relacionados al peso del envío y facilita el manejo y la gestión.

La globalización ha permitido que el consumo de ciertos productos ya no sólo se realice en su lugar de producción sino también en otras partes del mundo. Las frutas exóticas secas, por ejemplo, en el mercado europeo ha presentado un aumento de exportación en los últimos años, siendo uno de los productos con cierto standard de calidad establecidos para el otorgamiento de permisos de ingreso. Entre los principales requerimientos se tiene el contenido de humedad y la presencia de insectos, moho, daños y manchas. En general, según el Centro de Promoción de Importaciones de la Unión Europea (CBI siglas en ingles) para las frutas secas naturales sin conservantes o azúcares añadidos, el contenido de humedad debe ser menor que para las frutas con conservantes o azúcar añadidos. Para los mangos secos naturales, el contenido máximo de humedad es del 15% y para las piñas del 20%. Se tiene hoy en día que las importaciones europeas de estas frutas tropicales alcanzan los 43 millones de euros y se movilizan alrededor de 25 mil toneladas (incluyen mango, piñas y otros). [17]

Además, el CBI cuenta con un apartado específico para la importación de ajíes secos a partir de la creciente popularidad de la comida picante en Europa, siendo España el país comerciante con una representación de 36% de todas las importaciones europeas y también proveedor de chiles secos en Europa, seguidos por Alemania, el Reino Unido y los Países Bajos otros mercados interesantes. Hay algunos países importadores relativamente pequeños que están creciendo rápidamente y están importando cada vez más chiles directamente de los países en desarrollo. Los ejemplos incluyen Italia (creciendo un 14% anual en los últimos cinco años), Bulgaria (12%) y Rumania (11%). Según el CBI, se entiende como “chiles secos” a todos los frutos obtenidos de las plantas Capsicum, miembros de la familia Solanaceae, que generalmente se comercializan, enteros, en copos, en polvo molido, conservados en aceite o en salsas picantes. Como se aprecia en la figura a continuación, el aumento de volumen anual es de 6% y en 7% en valor entre los años 2013 y 2017; siendo el 67% de las importaciones provenientes de países en vías de desarrollo. Es importante mencionar también que el aumento de las importaciones de ajíes secos ha generado que ya no sólo sean los reexportadores europeos los encargados del procesamiento, tratamientos térmicos de especias y hierbas y envasado adicional; sino las empresas de los países de origen se hacen cargo cada vez más de estas actividades. Los procesadores europeos se centran en mejorar las actividades, por un lado, están enfocados en mezclar o desarrollar nuevos sabores, lo que significa que podrían estar interesados en especias y hierbas nuevas y exóticas; mientras también realizan el fortalecimiento del trabajo de cooperación con los exportadores en los países en desarrollo generando así transferencia de conocimiento y recursos. [18]

Figure 1: European imports of dried chillies 2013-2017

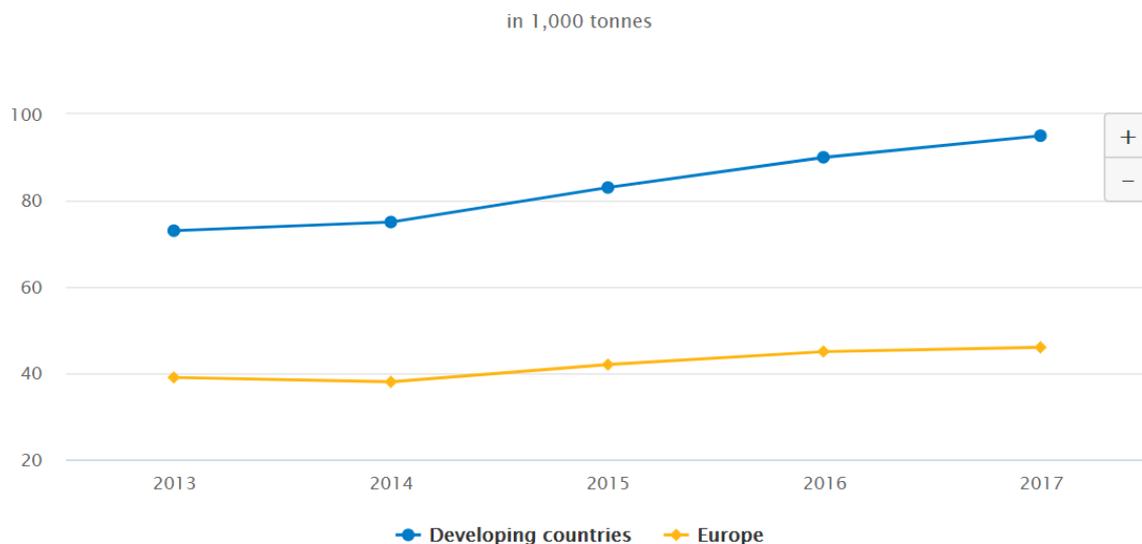


Figura 1-20. Importaciones de ajíes secos en Europa entre 2013-2017 provenientes de países en vías de desarrollo y Europa. [18]

Sin embargo, el abastecimiento sostenible es una tendencia importante en Europa que abarca obtener las especias de manera sostenible, aunque la certificación es aun rara y no atrayente para este producto en específico. En Europa, las certificaciones más importantes son Rainforest Alliance, UTZ, Organic and Fair Trade. En el 2018, Rainforest Alliance (sede en EE. UU.) se fusionó con la organización de estándares UTZ (sede en los Países Bajos), formando una nueva organización de estándares sociales y ambientales. Además, entre los requisitos legales de la propia página del CBI se encuentran:

- inocuidad de los alimentos: trazabilidad, higiene y control según lo especificado en la Ley General de Alimentos.
- Contaminación por micotoxinas: para los chiles, se establecen niveles máximos de micotoxinas para aflatoxinas (entre 5  $\mu\text{g}$  / kg para aflatoxinas B1 y 10  $\mu\text{g}$  / kg para el contenido total de aflatoxinas B1, B2, G1 y G2). Para la ocratoxina, el nivel máximo es de 15  $\mu\text{g}$  / kg.
- Niveles máximos de residuos de pesticidas: se pueden encontrar residuos de residuos de antraquinona en especias y hierbas como los pimientos ahumados como resultado del secado artificial con fuego. El humo contiene antraquinona, que puede terminar en el producto si no se toman las medidas de precaución adecuadas.
- Contaminación microbiológica: la presencia de salmonella es la razón principal para prohibir los chiles secos en el mercado europeo
- Aditivos alimentarios y adulteración: las autoridades aduaneras rechazan las especias y las mezclas de especias por contener niveles no declarados, no autorizados o excesivos de materiales extraños
- Niveles máximos de hidrocarburos aromáticos policíclicos: la contaminación con HAP proviene de malas prácticas de secado.
- Los compradores europeos exigen cada vez más a sus proveedores que utilicen la esterilización con vapor para combatir la contaminación microbiológica de los chiles secos. Sin embargo, las inversiones en el equipo necesario pueden ser muy costosas, de hasta € 1 millón y podría ser perjudicial para el cultivo, ya que puede dañar el sabor de los chiles secos. [18]

Entre los principales proveedores se encuentra China con una cuota de 43% en el 2017, mientras que Perú, India y Tailandia representan un porcentaje menor de 7%, 6% y 3% respectivamente. [18]

**Figure 3: Suppliers of dried chillies in developing countries to Europe, by processing level 2017**

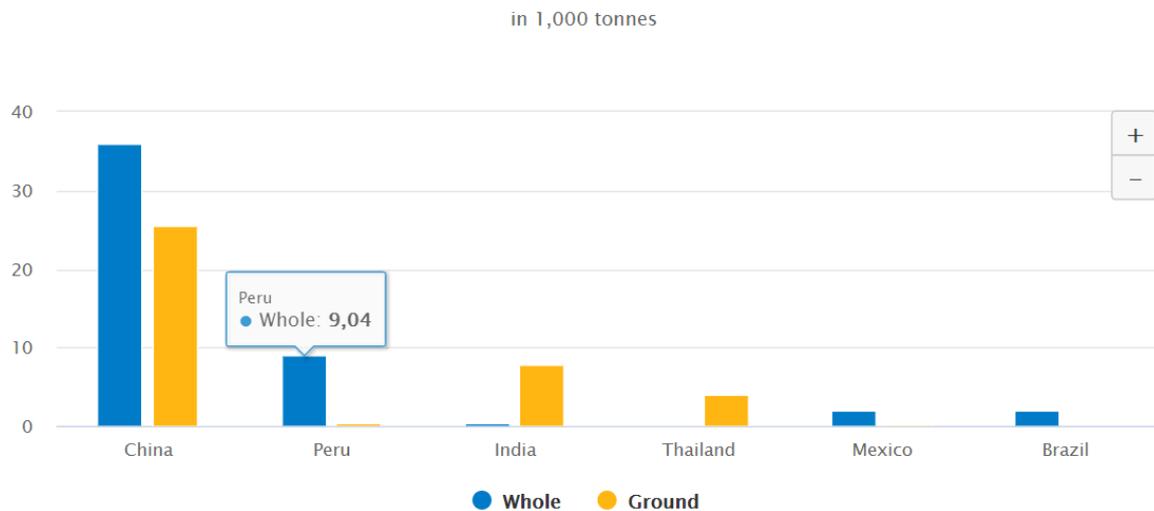


Figura 1-21. Importaciones de ajíes secos en Europa entre 2013-2017 provenientes de países en vías de desarrollo y Europa. [18]

Los precios minoristas de los ajíes molidos pueden subir a € 62,57 por kilo cuando se venden en pequeños contenedores dentro de la sección de especias y hierbas de los supermercados (mayo de 2018). Las hojuelas de chile seco pueden llegar hasta los 100 € por kg, mientras que los chiles enteros pueden costar hasta varios cientos de euros por kg. Generalmente, el precio de los ajíes secos se desglosan en un 10% para la materia prima, 10% procesamiento, 5% transporte, 25% importación y procesamientos extras y 30-50% por venta al por menor. [18]

Además, como parte del desarrollo del estado del arte, se ha revisado artículos relacionados a diferentes tipos de secadores, así como el modelamiento térmico de los mismos. Durante la búsqueda se ha identificado la importancia de la especificación sobre si este es de circulación natural o forzada, lo cual también permite desarrollar el modelamiento térmico. Los tipos de secadores más empleados son los secadores tipo invernadero directo, especialmente los de tipo túnel de larga escala.

En el artículo “Performance study of different solar dryers: A review” de Mustayen et al. identifica ciertos hallazgos de diseño, desempeño y aplicación de diversos tipos de secadores solar empleados y estudiados hasta la fecha por otros autores. Presentan su investigación dividiendo los secadores en tipo directo, indirecto, mixto, con convección natural y convección forzada. Para los secadores solares directos se revisó el diseño de Mühlbauer et al. que estudió secadores tipo caja y tienda que tienen una baja capacidad de uso; los secadores tipos caja generalmente contruídos de madera, cuenta con una cubierta transparente, aislamiento térmico alrededor y agujeros en la parte posterior de la caja para la renovación del aire. Por otro lado, Ondier et al., estudió el secado de arroz dispuesto en una sola capa que requería bajas temperaturas y bajas humedades relativas. Mientras que, Al-Juamily et al. investigó un secador solar tipo gabinete con solector, y ventilador; con lo que demostró que la temperatura era el factor principal de secado, pero se ve afectado si no hay luz solar disponible. Sobre los secadores solares indirectos Goyal and Tiwar usó el concepto de principal de primero calentar el aire en un colector plano solar para luego hacerlo atravesar la cámara de secado lo que simplifica el modelado térmico al resolver balances de energía y con mejor desempeño. Además, Sharma et al. estudió la capacidad de funcionamiento de este tipo de sistemas en climas hostiles y que representa una buena alternativa para granjas por el bajo costo. Sharma et al. investigó también sobre la construcción y desempeño de secadores del tipo indirecto y la importancia de la calidad del producto al mejorar la tasa y la eficiencia. Mientras que El-Sebaïi et al. empleando el secador solar de convección natural encontró una reducción en el tiempo de secado por el almacenamiento térmico en el colecto y pretratamiento a los productos. Otros tipos de secadores empleados son los del tipo mixto, Exell and Kornsakoo logran conseguir un valor óptimo de la sección de secado empleado modelado por computadora que es un modelo simple y económico que se suele usar para épocas de lluvia. Además, Simate, uso varios colectores solares con una cámara de secado para épocas de alta humedad.

Por otro lado, Zaman and Bala propusieron ecuaciones para el flujo natural de aire; identificaron que las variables de control más importantes son la temperatura y la humedad relativa; y compararon los secadores, directos, indirectos y mixtos eligiendo el último por tener mejor tasa de secado. Es Zomorodian et al. quienes estudian el sistema mixto activo con el arroz que empla la tasa del flujo del aire y el intervalo de descarga del producto son buenas alcanzando una eficiencia de 21.24%. Finalmente, Bala et al. presentan el empleo de secador solar tipo túnel empleando una red neuronal artificial para predecir el potencial del mismo. Otro tipo de sistema identificado es aquel que funciona con convección natural o también conocido como sistema pasivo para lo cual se comienza con el estudio de Oosthuizen, quien introduce es el primero en introducir este modelo de bajo costo y con resultados satisfactorios. Garg and Kumar presentan un secador tipo tuner de forma semi cilíndrica y con convección natural y estiman su desempeño con circulación forzada. Un tipo de secador es diseñado y probado por Later Ezeike que está conformado por un colector solar plano, una cámara de secado y una cámara de dehumidificación empleando desecante, que es un tipo de gel de sílice. Finalmente, para los secadores con convección forzada Midilli emplea un sistema de secado asistido solar que se presenta como una alternativa simple y disponible para el secado de pistachos. Por otro lado, Sodha et al. usa un secador tipo gabinete con un modelo capaz de predecir la temperatura y contenido de humedad. Además, un secador solar propuesto por Ratti and Mujumdar es estudiado para predecir su funcionamiento empleando la tasa de secado, la temperatura de secado y el contenido de humedad teniendo al tiempo como variable independiente. También, Arata and Sharma presentan un secador con un buen sistema de predicción de la temperatura y contenido de humedad bajo parámetros de control. Mientras que Pawar et al, propone secadores que emplean otros combustibles por lo que se disminuye el tiempo de secado para las industrias grandes de comidas y químicos. [19]

Otro artículo importante es el “Review on various modelling techniques for the solar dryers” de Om Prakash et al. en donde se ha estudiado sobre diversas técnicas de secado con la finalidad de ahorrar tiempo e inversión de capital ante la posibilidad de la construcción de un sistema de secado para un producto en específico logrando así simular, predecir diversos parámetros y seleccionar materiales. Las técnicas de modelado además han sido empleados en otros campos para lograr la simulación, trabajar en la optimización y control de sistemas fotovoltaicos; así como otros problemas complejos de transferencia de calor convectivo en el aire, transporte de humedad en el aire, calor envolvente de la construcción y modelo del contenido de humedad. Entre las diversas técnicas de modelado se encuentran inicialmente Dinámica de Fluidos Computacional CFD (siglas en inglés), este modelo requiere un análisis numérico y algoritmos para el estudio del fluido; y la condición límite. Se suele emplear el software FLUENT para simular el movimiento del aire y su interacción dentro de la cámara de secado. Son 3 las condiciones establecidas para la simulación, la primera es asumir un valor constante de masa de aire fija al ingreso de 25 m/s e intensidad de turbulencia de 4.0%; la segunda es la condición límite sin resistencia, la masa que ingresa sale; se considera un esfuerzo cortante para la tercera condición límite; estas condiciones permiten predecir las velocidades del aire del secador otorgando una buena relación con la información experimental. Este sistema permite también mejorar la eficiencia del secado al seleccionar el lugar exacto de los agujeros de entrada y de salida y otros parámetros de funcionamiento. La metodología inicia a partir de estudiar la física del fluido (inicialmente aire caliente); la creación de una “malla” en el interior del secador; planteamiento de las ecuaciones de continuidad, momento y energía con ayuda de la conservación de la masa, momento y energía para su derivación; la programación del lenguaje y los resultados de la simulación. El modelado ANFIS está basado en una equivalencia funcional con ciertas restricciones, haciendo necesario conocer varios datos de entrada de diferentes sistemas. ANFIS emplea un algoritmo basado en una red neuronal que requiere el número inicial de parámetros para lograr buenos resultados. El modelado realiza un número de entradas y emplea la ley basada en lógica difusa que principalmente relativiza los datos. Además, debido a la habilidad de autoaprendizaje se establece una mínima posición de error. Con este sistema Bagheri N., Nazilla, T. and Javadikia H. investigaron y desarrollaron un modelo ANFIS en donde los resultados fueron más apropiados sobre la predicción de la eficiencia de energía en comparación con el modelo empírico. La investigación también se utiliza para generar la temperatura de producto azúcar (jaggery), temperatura de evaporación y contenido de humedad en el aire. Otro modelado es el de ANN también basado en redes neuronales para estimar los parámetros y depende de un buen número de valores de entrada. La capacidad que tiene este modelado es producir datos de desarrollo dados a partir de datos desconocidos. Este modelo se basa en un sistema nervioso biológico en donde varios sistemas están interconectados entre sí. En el campo de un modelado ANN se estudian parámetros de secador solar como la temperatura interior de la cámara de secado, velocidad del viento, exterior e interior del contenido de humedad del aire. Además, se investiga sobre la eficiencia del secado. El Modelado FUZZY emplea la lógica difusa que permite predecir con precisión los resultados con un error mínimo y puede ser replicado a diferentes lugares consistentes a diferentes climas,

temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa. El modelado térmico se basa en entender que la energía solar se transforma en energía térmica dentro del secador; se basa principalmente en balances de energía en el material de la cubierta, en el producto, en el suelo y en la cámara dentro del invernadero. Estas ecuaciones permiten determinar la temperatura del aire a la salida del secador, la cantidad de energía intercambiada, la eficiencia del secador y calor empleado para el proceso. El modelado matemático del secador solar está basado en el empleo de la ratio de la variación de humedad y se basa en diferentes modelos experimentales que describan la curva de secado. Entre los más conocidos se encuentra el modelo Newton, Page y Page modificado. Finalmente, el Modelado de secado cinético de capa fina se aplica en las propiedades de transporte. Se obtiene una constante K que se aplica justamente durante la etapa secado constante para el caso de la deshidratación de alimentos. La suma de todas las constantes y características de secado como el transporte sirven en la aplicación a través de la ecuación de secado de capa delgada en el sistema. [20]

Otro artículo importante en la literatura es “Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review” de Lamidi et al. Este no sólo expone una investigación sobre la energía solar térmica sino combinada con diferentes alternativas para el proceso de secado que abarca dos principales enfoques, el primero es la de mejorar la eficiencia empleando aislamiento, recirculación y alterando las restricciones operativas del sistema; la segunda, el mejorando o sustituyendo el suministro de energía con sistemas híbridos. El artículo brinda información de la física del secado, sistemas híbridos, recuperación/pérdida de energía en el secado de alimentos, materiales de cambio de fase, efecto de diferentes métodos de secado en la calidad del producto final, modelado matemático y/o computacional para su empleo en procesos de secado, análisis de exergía, evaluación económica y ciclo de vida del proceso de secado. Para la física del secado con energías renovables, se menciona sobre la eficiencia del secador se evalúa como la energía empleada para la evaporación entre la energía total suministrada. En el caso de sistemas híbridos hay una necesidad debido a la discontinuidad de la operación empleando la energía solar. Menciona también diferentes investigaciones como de Lopez-Vidane et al. que combina un sistema de solar con gas licuado de petróleo (GLP) con una eficiencia de secado de 45% con sólo GLP, 15% con solar y 33% con el sistema híbrido. Por otra parte, sistemas de secadores empleando solar con desecante desarrollado por Misha et al. reduciendo así el tiempo de secado de 20.75 h a 15.75h al emplear también el desecante. Ceylan et al. emplea cera parafina con un concentrador solar para un almacenamiento térmico asegurando así un secado continuo aún sin luz solar. Además, Amer et al. investigó un sistema híbrido de solar con energía eléctrica empleando agua para almacenamiento térmico para un proceso continuo logrando así reducir contenido de humedad en un plátano de 82% a 18% (base húmeda) Sin embargo, se menciona lo apropiado del uso de la biomasa como una alternativa más viable en zonas remotas. Por otro lado, para las pérdidas o recuperación de calor en el proceso de secado se menciona que el calor que se del aire a la salida de otros procesos o sistemas de enfriamiento pueden ser empleado para procesos de secados que se conoce como sistemas de trigeneración o unidades energía y potencia combinado (CHP siglas en ingles). Otra posible mejora es el empleo de materiales de cambio de fase como una de las alternativas de para el almacenamiento de la energía térmica (TES siglas en inglés), que es esencial y efectivo para muchas tecnologías de las energías renovables. El TES suele dividirse en la energía sensible, calor latente y reacciones termoquímicas. La ventaja de los materiales de cambio de fase es su alta densidad energética y por ende su mayor capacidad e almacenar energía en menor fluido, siendo entre 5-14 veces mayor por unidad de volumen que en calor sensible. Jain and Tiwari emplearon este material en un secador tipo indirecto con colectores solares logrando un delta de temperatura de 6°C por encima de la temperatura ambiente durante 5 a 6 horas después que el sol se había ocultado; y con una tasa de retorno de 65% y período de recuperación de 1,57 años. Si el volumen y masa no son limitados la energía sensible se convierte en un buen candidato. Por otro lado, estudiar el efecto de diferentes métodos de secados en la agricultura también es importante. Por ejemplo, Hussein et al. analizó ciertos parámetros de tomates secos como humectabilidad, índice de absorción de agua, índice de solubilidad, densidad aparente y propiedades organolépticas. En otro artículo de Reyes et al. emplea resistencia eléctricas y parafina para deshidratar champiñones, pero estos tenían un color y encogimiento inusual comparado con los frescos. Borah et al. estudió cuatro secadores distintos de biomasa y solar, horno eléctrico, lecho fluidizado y secado al sol para procesar jengibre y cúrcuma obteniéndose mejores resultados con el solar-biomasa. Por otra parte, en el caso del modelamiento matemático o computacional este es empleado con la finalidad de optimizar el proceso, así como entender de mejor manera el proceso de secado, la cantidad de calor y masa transferidos, la influencia de factores externos, costos requerimientos de espacio, mantenimiento y experimentación técnica. Generalmente, las herramientas de simulación empleadas son Aspen Plus, Simprosys, dryPak, DryDSim, etc. Mientras que también se suelen emplear softwares no específicos como Matlab y Microsoft Excel con Visual Basic. Olawale and Omole investigaron una bandeja de secado con rebanadas de papa empleando Matlab como un rango de temperaturas entre 50°C y 80°C, flujo de aire de 2.5 m/s y una humedad relativa del aire de 10%;

los resultados obtenidos experimentalmente empleando diferentes modelos de secado en Matlab entregaba la tasa de secado, temperatura constante y la curva de secado del producto empleando un modelo Page de manera precisa. Asimismo, se menciona el empleo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD siglas en inglés) como una alternativa para entender el comportamiento del fluido en el interior de la cámara de secado. Finalmente, el software DryDSim combina Matlab con Solid Works fue usado por Neba y Nono, para predecir correctamente el diseño y parámetros de operación de un secado, y el requerimiento de briquetas de biomasa. Sin embargo, a pesar de que un buen modelo computacional que integra la transferencia de masa y calor, permite realizar un análisis de sensibilidad; el cuello de botella se encuentra en la falta de información de las propiedades de los alimentos. En este artículo también se revisa lo concerniente al análisis de exergía, entendiéndose esta como el trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se logra cuando existe una interacción entre un sistema y su entorno; denota por ende una función de irreversibilidad con el sistema. La evaluación de la exergía permite evaluar el costo termodinámico de la irreversibilidad y reducir las pérdidas en el proceso de secado. La eficiencia exergética es directamente proporcional al caudal másico del producto e indirectamente proporcional la temperatura, caudal másico del aire y el radio de humedad. Se estudió la exergía de un colector solar con tubos al vacío para calefacción y secado de productos por Daghigh y Shafieian, obteniéndose que el sistema en donde el calor se almacena en un tanque de agua, depende del tiempo y la temperatura del ambiente, mientras que mayor destrucción de exergía se identificó con mayor radiación solar durante el día y mayor temperatura del ambiente. Otro ejemplo se identifica empleando un intercambiador de calor en su investigación Ghasemkhani et al. para recuperar el calor perdido en el escape de un secador de tambor giratorio pasando 23% a 96.1% de eficiencia exergética. Otro caso interesante de estudio fue el desarrollado por Celma y Cuadros para el secado de merma de agua de acaiturna en un secador tipo gabinete durante dos días; en el primero la eficiencia exergética varió entre 53.4-100% y 34.4%-100% en el segundo. Se identificó entonces que el segundo día cayó debido a que la ratio de secado disminuyó haciendo que no se pueda aprovechar toda la energía suministrada. Es así que se resume que la pérdida de exergía se observa que disminuye con el tiempo de secado por lo que se busca optimizar los sistemas de secado al reducir la irreversibilidad de la exergía con recuperación de calor, recirculación de aire y mejor aislamiento. También este artículo presenta la evaluación económica por la relevancia de reducir los costos de inversión de esta tecnología en el sector rural. Por ejemplo, un análisis económico de rediseño de un secador de anacardos impulsado por vapor de 180 kg de capacidad fue realizado por Dhanushkodi et al. resultando en una recuperación de la inversión en 1.58 años, 1.32 año y 1.99 años y costo beneficio de 5.23, 4.15 y 3.32 para un sistema solar, biomasa e híbrido respectivamente; por lo cual se seleccionó el sistema híbrido como mejor alternativa. Otro ejemplo es el de Chauhan et al. que fabricó un secador tipo invernadero con circulación forzada con un colector solar y un extractor de aire. Con el flujo de aire de 0.0551 kg/s se calculó una reducción de contenido de humedad de 96.8% a 12.2% en 17 horas y la inversión se recupera en 1.5 años. Se menciona también que es necesario además de la evaluación técnica y económica otros estudios socio-culturales de la percepción de los agricultores sobre las tecnologías de las energías renovables para el secado. El ciclo de vida permite analizar el ahorro de gases de efecto invernadero con diferentes tecnologías, por ejemplo, Prakash y Kumar obtuvieron una emisión de 38.06 toneladas de CO<sub>2</sub> empleando un secado solar tipo invernaderos para hojuelas de tomate en comparación 613.48 toneladas de CO<sub>2</sub> de un sistema que secaba con electricidad a partir carbón. Finalmente, a modo de conclusión se menciona que los sistemas híbridos de solar y biomasa son prometedores por tener control operacional mantenido ya que reduce los efectos de intermitencia solar, la biomasa se puede conseguir en el sector rural, la leña se suele usar predominantemente para calefacción y esos sistemas son económicamente superiores a otros. [21]

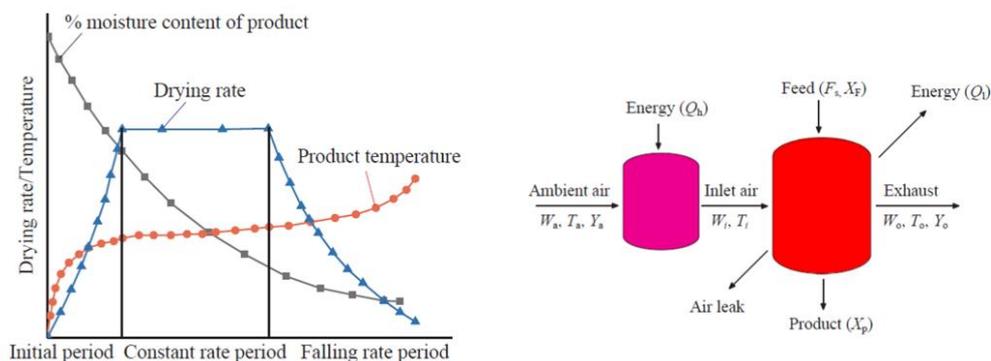


Figura 1-22. Izquierda: curvas de secado. Derecha: Representación de secadores convectivos [21].

Otro estudio es el “Recent development in greenhouse solar drying: A review” desarrollado por Singh et al., en este se menciona que para el secado de productos agrícolas y no agrícolas y que la energía solar puede ser usada directamente o indirectamente. El aumento de la población es el mayor problema que enfrenta hoy en día el mundo. Por eso la importancia del secado, porque las cosechas, pueden ser almacenadas por una mayor cantidad de tiempo sin temor a que se deteriore. Varias modificaciones e investigaciones se han hecho para mejorar el desempeño de los secadores tipo invernadero que son estudiadas en este artículo. Algunas modificaciones realizadas a estos secadores tipo invernadero pasivos o activos registradas durante la implementación son: Secadores tipo invernadero con paneles fotovoltaicos integrados; uso de muro opaco en la pared orientada al norte para aislado (hemisferio norte) y prevenir pérdidas de calor; uso de materiales de almacenamiento térmico como arena, cama de piedras, piso de concreto con pintura negra y láminas de PVC; muro orientado al norte inclinado y reflectivo para recolectar el máximo posible de radiación; uso de secador tipo invernadero acoplado con colectores solares de aire para conseguir secado acelerado; provisión adicional de paneles maximizadores de área para mejorar el proceso secado. Jainjai et al. desarrolló un secador solar de tipo invernadero con forma parabólica, con un sistema de ventiladores accionado por paneles fotovoltaicos y un piso de concreto negro, en este se secan 150kg de ajíes frescos. Se obtiene que el contenido de humedad pasa de 80% a 10% (base húmeda) en un periodo que varía entre 2 a 3 días y medio. Janai et al también ha realizado una investigación de longan pelado y banana dentro del secado tipo invernadero, en donde la temperatura variaba entre 30 °C a 60 °C en 3 días de secado y 31°C a 58°C en 4 días de secado, respectivamente. Mejores resultados de color y sabor se obtuvieron en comparación con el secado al sol que se realizó paralelamente; en donde requirió 5 días para el longan y 6 días para la banana. Mientras Kumar y Tiwari investigaron el coeficiente convectivo de transferencia de masa en un secador de hojuelas de cebolla con diferentes cargas de 300 g, 600 g y 900g. Otra investigación, de Sethi y Arora estudia el empleo de una pared reflectiva inclinada en el lado norte (hemisferio norte) obteniendo que el tiempo de secado se redujo un 13.13% con circulación natural y 16.67% con circulación forzada. Ademas Rathore y Panwar desarrollaron un secador solar tipo tunel de forma semi cilíndrica con capacidad de 320 kg de upa en donde la temperatura varió entre 10 a 28°C y el contenido de humedad pasó de 85% a 16% en 7 días; este sistema también empleo aislamiento en el suelo y en la pared orientada al norte (en el hemisferio norte). Se tiene también la experiencia de Kaewkiew et al. que desarrolló un secador tipo invernadero de forma parabólica de 160m<sup>2</sup> para secar 500kg de ajíes; obteniendo una reducción de 74% a 9% (w.b.) en 3 días, mejor en comparación a los 5 días necesarios con el secado al sol y mejor sabor, color y picante. Por otro lado, Ramos et al. desarrolló un secador tipo mixto al norte de Portugal y un modelado con transferencia de calor y masa para lograr así optimizar, controlar y predecir el tiempo de secado de los productos. Ayyappan et al. desarrolló un secado solar tipo invernadero integrado por un sistema de almacenamiento en concreto, cama de piedras y arena; obteniendo mejores resultados con la cama de piedra para el secado de coco. Otro tipo de investigación la realizó Sallam et al. con dos secadores directo e indirecto dimensionados igualmente; en donde menciona que la convección forzada entrega mayores tasas de secado que el natural; y el de convección forzada tiene la misma tasa de secado así sea directo o indirecto el sistema. Otra mejora, de Jitjack et al. propone ampliar el área de captación de un secador tipo invernadero de forma parabólica a los lados en 7%; sin embargo, la eficiencia aumentó en promedio 15% con 11°C de mayor temperatura en comparación con uno sin mayor área. Otro tipo de mejora propone Morad et al. al construir secadores tipo invernadero túnel para plantas de menta con un sistema de termostato que le permitía controlar que la temperatura no supere los 50°C. Como conclusiones finales varios resultados son analizados, en un secador tipo invernadero el modo activo es mejor que el pasivo; la convección forzada es más requerida para productos con alto contenido de humedad; mejores características del producto se obtienen con el secado solar en lugar que con el secado al sol; la pared con aislamiento que se encuentra orientada al norte reduce pérdidas; entre otros. [22]

Considerando que este trabajo de fin de máster (TFM) requiere la información para su aplicación en el modelado térmico, el modelado numérico y el modelado de secado cinético de capa fina se revisa a mayor detalle el artículo de Prashant Sigh et al. “A review on thermal models for greenhouse dryers” [23]. Existen modelos desarrollados considerando un secador de tipo invernadero con el cual se realizan ciertas hipótesis para predecir el desempeño de los invernaderos con una operación con circulación natural o forzada. Estas simulaciones permiten investigar los efectos de variar ciertos parámetros durante diseño; así como predecir el desempeño dependiente de los coeficientes de transferencia de calor y masa; por lo cual algunos parámetros empíricamente obtenidos son presentados. Asimismo, se presenta información relevante sobre el contenido de humedad de algunos productos, la temperatura máxima permisible para el secado y los modelos matemáticos más empleados. El modelado térmico generalmente se clasifica en el tipo de circulación natural o forzada. Es así que dentro de los secadores con circulación forzada se han revisado a mayor detalle cuatro artículos con modelos matemáticos más relacionados a los de este TFM. El artículo “*Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar*

*greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana*” de Serm Janjai el modelo térmico de un secador del tipo directo en forma de túnel de cubierta circular con convección forzada empleando un ventilador accionado con energía solar fotovoltaica. El modelo térmico es en base a los balances de energía en la cubierta, suelo, aire y producto, así como un balance de masa; permitiendo predecir dentro de un aceptable límite de exactitud de  $\pm 10\%$ . El tiempo de secado empleando un secador tipo domo, con el secado expuesto directamente al sol, emplea 3 días en comparación 6 días para *longan* pelado; mientras que en el caso de la banana se emplea 4 días en el secador en comparación de 6 días expuesto al sol [24]. Además, también de Serm Janjai se tiene “*A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic*” con el modelo térmico desarrollado de un secador tipo túnel de cubierta circular con convección forzada presenta el artículo para el secado de otros productos, como el ají o *chilli* y café en donde presenta en todos los casos el contenido de humedad que alcanzó el producto después de un tiempo de prueba. Una vez más, el modelo empleado predice correctamente al tener la comparación de los datos simulados con los obtenidos de la experimentación [25]. También se revisó dos modelos de secadores propuestos en el artículo “*An Investigation on the performance Improvement of greenhouse-type agricultural dryers*” por Turhan Koyuncu. Los modelos son del tipo activo y directo, que se caracterizan por tener una forma trapezoidal truncada con marco de metal, policarbonato y fondo absorbente pintado de negro. El primero de ellos, tiene un área para el producto de  $1.62 \text{ m}^2$ ; mientras que el segundo, tiene un área de  $1 \text{ m}^2$ . Se realizaron pruebas con los secadores sin carga y con carga de pimientos; así como, con chimenea y sin chimenea para la influencia de la velocidad de secado; y, secado de pimientos expuestos directamente al sol. Se obtuvo que los secadores fueron de 2-5 veces más eficientes que el secado a sol directamente; la chimenea permite el aumento del flujo de masa de aire; y la superficie absorbente del fondo aumenta la eficiencia [26]. Otro artículo interesante es “*Thermal performance evaluation of modified active greenhouse dryer*” de Prakash y Kumar, el cual propone el análisis del comportamiento térmico de un secador del tipo directo en forma de túnel de cubierta de dos aguas con convección forzada. El artículo se centra en la comparación del sistema con una capa de PVC en el suelo, o sin, empleando también un espejo en la superficie lateral no expuesta al sol con la finalidad de disminuir las pérdidas. Se realizaron pruebas para verificar las mejoras del secador modificado sin carga obteniendo resultados positivos [27]. Entonces a modo de conclusión se tiene que el modelado ayuda como se ha visto al diseño al entender mejor los parámetros que rigen de mayor o menor manera en su desempeño. También en el artículo se reconoce que la convección forzada entrega mejores resultados con productos con medio y alto contenido de humedad en el producto. Finalmente, este tipo de artículos es altamente útil para los investigadores y científicos interesados en el desarrollo de programación y simulaciones en computadora y softwares especializados.

# 2 COMPORTAMIENTO DE UN SECADOR TIPO DOMO

---

*“The most beautiful thing we can experience is the mysterious. It is the source of all true art and science. He to whom the emotion is a stranger, who can no longer pause to wonder and stand wrapped in awe, is as good as dead—his eyes are closed.”*

*- Albert Einstein -*

Como se ha podido describir en el capítulo anterior, existen múltiples sistemas de secadores solares que se caracterizan por la posibilidad de necesitar un subsistema de captación solar y el tipo de circulación empleada. Considerando la dificultad de agricultores o pobladores del sector rural por acceder a tecnologías de alto costo de inversión, es que se propone el desarrollo de un secador tipo domo, fundamentalmente por las ventajas constructivas del modelo, y, puede ser catalogado como un sistema activo de tipo integral. En este capítulo se explica sobre el principio de funcionamiento del secador, los elementos que la conforman, el modelo térmico, las correlaciones para las propiedades del aire y la metodología empleada para el desarrollo del sistema. Así mismo, las variables empleadas en este capítulo se encuentran debidamente identificadas en el apartado “Notación”.

## 2.1 Secador solar tipo domo

En los últimos años se ha difundido el empleo de los domos geodesicos para diferentes aplicaciones ya que es atractivo por tener diversas ventajas como alta resistencia estructural, resistencia al viento, cantidad mínima de materiales, no requiere soportes interiores, transportabilidad, etc [28]. Por otro lado, un secador del tipo domo geodesico como sistema pasivo de tipo distribuido, con dos domos concéntricos, evitando el paso de la radiación directamente, ya ha sido antes empleado para el secado de frutas en especial las uvas obteniendo resultados empíricos considerables eliminando el 70% del contenido de humedad en diez días de condiciones de cielo despejado y con presencia de nubes, y se aumenta alrededor 22°C para verano y 10°C para invierno [29].

### 2.1.1 Principio de funcionamiento

El secador tipo domo, es un invernadero para el secado de frutas que como su nombre indica funciona empleando el efecto invernadero, es decir, deja ingresar los rayos del sol que al llegar al producto o al suelo y ser luego emitidos por dichos cuerpos cambia su longitud de onda sin poder salir nuevamente. De esta manera, se logra aumentar la temperatura del aire al interior aumentando así su capacidad de absorber el agua que se evapora del producto. El secador está conformado por una sola cubierta en forma de domo que permite el ingreso del aire nuevo por la parte inferior empleando un extractor ubicado en la parte superior central de la cubierta, asegurando así de que el aire circule a través de los productos, la necesidad de renovar el aire es para así asegurar que haya una correcta eliminación del agua evaporada al exterior. Los productos están situados en cinco bandejas de forma trapezoidal dispuestas de forma circunferencial en el domo.

## 2.1.2 Elementos del secador solar tipo domo

### 2.1.2.1 Estructura

La estructura de un domo geodesico está conformado por un número de triángulos que por su arreglo permite la creación de domo geodésicos con una conformación tetraedro, octaedro e icosaedro. Con este tipo de arreglos lo que se logra que ningún miembro de la estructura sufra flexión sino se encuentren sometidos solo a la compresión o tensión pura [28]. Para el estudio del comportamiento térmico de un secador tipo domo, la influencia de la estructura es despreciable.

### 2.1.2.2 Cubierta

Esta superficie debe permitir el paso de los rayos del sol por lo que se requiere emplear un material semitransparente. El vidrio es el elemento más comúnmente usado para aplicaciones solares, sin embargo, en el caso de invernaderos generalmente se emplea el polietileno por tener un bajo precio, flexibilidad y simplicidad en la fabricación. La cubierta de polietileno debe pasar por un proceso de termosellado para darle la forma de domo requerida.

### 2.1.2.3 Suelo

El secador tipo domo puede instalado en cualquier tipo de suelo, sin embargo, es ideal emplear material impermeable para evitar el ingreso de la humedad del suelo. Por otro lado, el suelo completamente aislado permitirá evitar pérdidas en el subsuelo y un suelo con material de alta absortividad permitirá que parte del calor sea acumulado comportándose como un almacenamiento térmico. Para nuestro modelo se ha considerado que el suelo no se encuentra aislado, pero cuenta con material impermeable para evitar problemas de humedad.

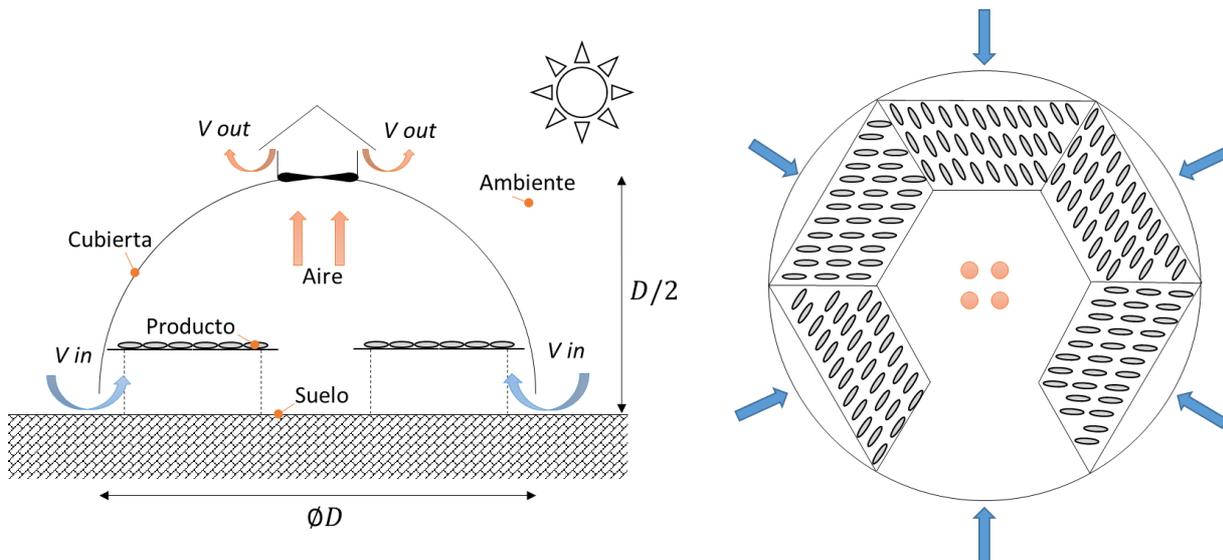


Figura 2-1. Secador solar tipo domo. Izquierda: Sección de vista lateral. Derecha: Sección de vista superior.

## 2.2 Modelo del comportamiento térmico

Para el desarrollo del modelo matemático es necesario plantear las ecuaciones de transferencia de calor y masa que se dan durante el funcionamiento del domo, con la finalidad de predecir su comportamiento y analizar la influencia de los parámetros involucrados. Es necesario también realizar ciertas suposiciones para el desarrollo del modelo como:

- No hay estratificación del aire dentro del secador.
- Empleo de modelo de secado de una sola capa.

- El calor específico de la cubierta y el producto son constantes.
- La capacidad de absorción del aire es despreciable.
- La influencia de las estructuras del domo y bandejas son despreciable.
- La variación de la geometría del producto durante el proceso de secado es despreciable.

Este modelo del comportamiento térmico permite estimar temperaturas dentro del secador, la variación del contenido de humedad del producto y la humedad relativa del aire a la salida del domo según los parámetros climatológicos externos para una velocidad de secado y cantidad de producto.

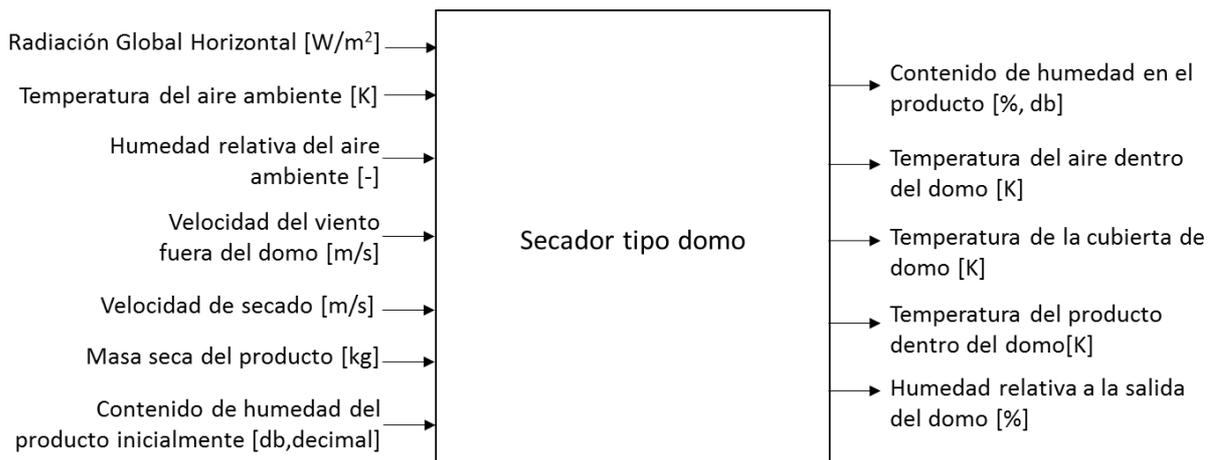


Figura 2-2. Caja negra del secador con variables de entrada y variables de salida.

Tabla 2-1. Variables de entrada y salida con su correspondiente notación

VARIABLES DE ENTRADA	NOTACIÓN	VARIABLES DE SALIDA	NOTACIÓN
Radiación Global Horizontal [W/m <sup>2</sup> ]	$I$	Contenido de humedad del producto [db, %]	$X$
Temperatura del aire ambiente [K]	$T_{amb}$	Temperatura del aire dentro del domo [K]	$T_a$
Humedad relativa del aire ambiente [-]	$RH$	Temperatura de la cubierta del domo [K]	$T_c$
Velocidad del viento fuera del domo [m/s]	$vv$	Temperatura del producto dentro del domo [K]	$T_p$
Velocidad de secado [m/s]	$C$	Humedad relativa a la salida del domo [%]	$RH_s$
Masa seca del producto [kg]	$mp$		
Contenido de humedad del producto inicialmente [db, decimal]	$X_{pi}$		

### 2.2.1 Análisis del flujo másico del aire

Para el análisis del comportamiento térmico dentro del domo es necesario relacionar la velocidad del fluido que

viaja desde el ambiente por el interior del domo. Para lograr esta relación se asume que el flujo másico del aire es constante y se divide para atravesar el producto por la parte superior y la parte inferior por igual.

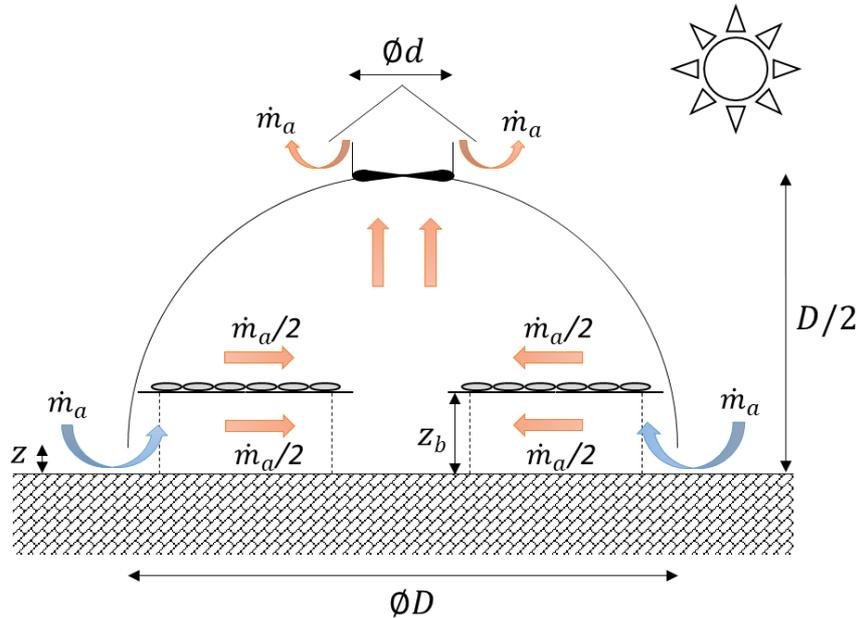


Figura 2-3. Relación del flujo másico al interior del domo.

Por lo tanto, el flujo másico a la entrada será la densidad del aire húmedo en este punto por el caudal de ingreso. Dicho caudal se obtiene con la velocidad de entrada necesaria y la sección de ingreso

$$\dot{m}_a = \rho_a * V_{in} \quad (2-1)$$

$$V_{in} = \pi * D * z * v_e \quad (2-2)$$

Por otro lado, se realiza una aproximación para el flujo másico superior e inferior viajando por el producto.

$$\frac{\dot{m}_a}{2} = \rho_{ad} * A_s * C \quad (2-3)$$

$$A_s = \frac{D}{2} * z_b \quad (2-4)$$

Finalmente, a la salida del fluido se tendrá que

$$\dot{m}_a = \rho_a * V_{out} \quad (2-5)$$

$$V_{out} = \frac{\pi * d^2}{4} * v_s \quad (2-6)$$

Es así como, a partir de dichas relaciones, es posible definir la velocidad de secado que atraviesa el producto con la finalidad de estudiar la influencia de este para tiempos de secado.

### 2.2.2 Análisis de transferencia radiante en el producto

Así mismo, para la simplificación del modelo del domo se ha considerado que en el caso exista más de un nivel por la cantidad de producto que se coloca en el domo, la transferencia radiante se da entre el nivel superior con la cubierta y el nivel inferior con el suelo.

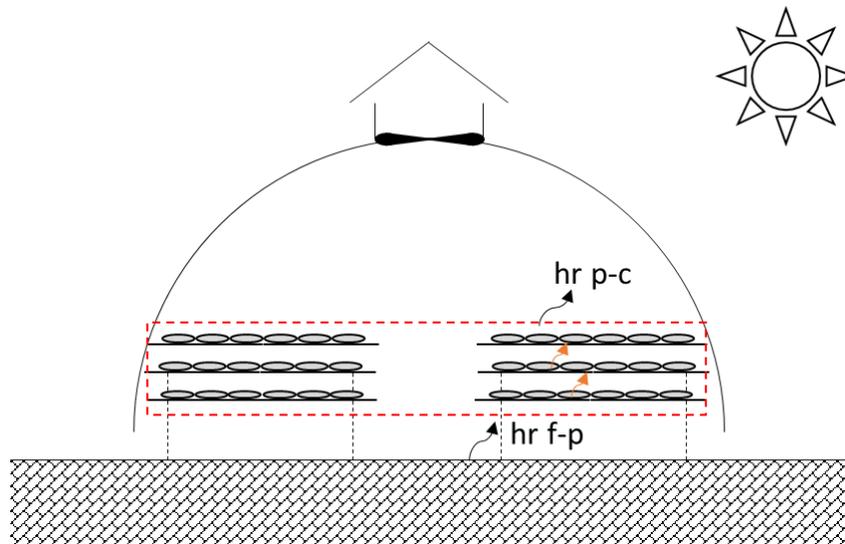


Figura 2-4. Análisis de transferencia radiante en el producto.

El área de producto  $A_p$  guarda relación con la masa de producto inicial  $M_{Pi}$  que puede caber en una superficie, siendo para el ají fresco una relación de  $10 \text{ kg/m}^2$  aproximadamente.

$$M_{Pi} = X_{pi} * m_p + m_p \tag{2-7}$$

$$A_p = \frac{M_{Pi}}{10} \tag{2-8}$$

Como para la simulación el domo tiene un diámetro establecido, también tiene un área de bandeja  $A_b$  máximo, se puede obtener dependiendo la masa de secado que colocará inicialmente los distintos niveles requeridos. Lo que nos permite definir la fracción solar  $F_p$ , como la radiación que llega al área del producto expuesta (un solo nivel o varios niveles) en relación con el área de la cubierta.

Debido a que todas las superficies al interior del domo interactúan térmicamente entre ellas y se ven influenciadas por cantidad de agua que se evapora, se desarrollan los balances de energía en la cubierta, en el aire interior, el producto, el suelo y la conservación de masa se plantea usando el modelo para secado de una sola capa.

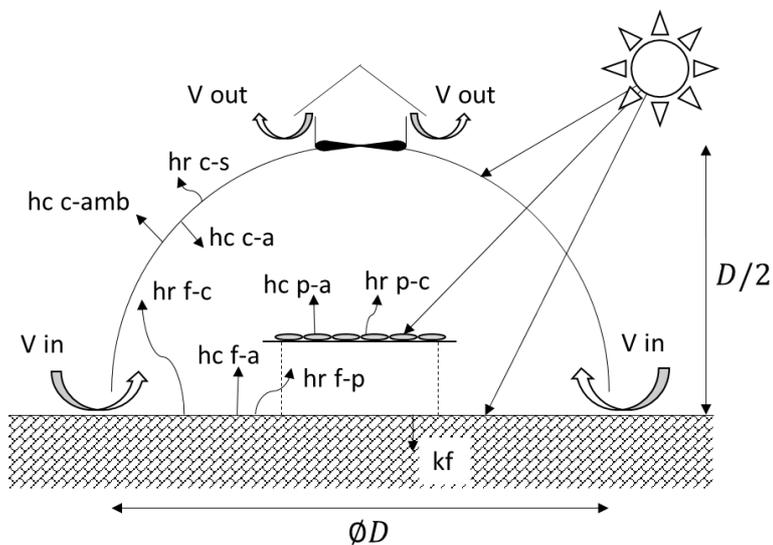


Figura 2-5. Coeficientes convectivos, radiantes y conductivos de transferencia de calor que interactúan en un secador tipo domo

## 2.3 Balances de Energía

Para el secador tipo domo u otro tipo de secador, la energía no puede crearse ni destruirse, es decir, los cambios de energía interna de un cuerpo que integre el sistema, entre su estado inicial y final, se dan por los intercambios de energía con otros cuerpos. Es así como, cada cuerpo se verá afectado dependiendo de la forma en que se da el intercambio de energía que puede ser de manera convectiva, conductiva y radiante. Para nuestro modelo se describe dichas interacciones y la variación de esta en la unidad de tiempo [min].

### 2.3.1 Balance de energía del aire al interior del domo

La variación de la energía térmica del aire corresponde a la energía proveniente del calor sensible del producto, la variación de energía en la entrada y salida del secador, la transferencia por convección del producto al aire y la transferencia por convección del suelo al aire.

$$\begin{aligned}
 ma * Cpa * \frac{dT_a}{dt} & \quad (2-9) \\
 & = Ap * Dp * Cpv * \rho p * (Tp - Ta) * \frac{dXp}{dt} \\
 & + (\rho a_{out} * V_{out} * Cpa * Ta - \rho a_{in} * V_{in} * Cpa * Tamb) * 60 + Ac \\
 & * hc_{c-a} * (Tc - Ta) * 60 + 2 * Ap * hc_{p-a} * (Tp - Ta) * 60 + Af * hc_{f-a} \\
 & * (Tf - Ta) * 60
 \end{aligned}$$

### 2.3.2 Balance de energía en la cubierta

La variación de la energía térmica de la cubierta corresponde a la transferencia por convección con el aire dentro del secador, la transferencia radiante con el cielo, la transferencia por convección con el aire fuera de la secadora, la transferencia radiante del producto a la cubierta, la transferencia radiante de piso a cubierta y ganancia solar.

$$\begin{aligned}
 mc * Cpc * \frac{dT_c}{dt} & = Ac * hc_{c-a} * (Ta - Tc) * 60 + Ac * hr_{c-s} * (Ts - Tc) * 60 \\
 & + Ac * hc_{c-amb} * (Tamb - Tc) * 60 + Ap * hr_{p-c} * (Tp - Tc) * 60 \\
 & + Af * hr_{f-c} * (Tf - Tc) * 60 + Ac * \alpha c * I * 60
 \end{aligned} \quad (2-10)$$

### 2.3.3 Balance de energía en el producto

La variación de la energía térmica del producto corresponde a la transferencia convectiva de aire al producto, la transferencia radiante de la cubierta al producto, la energía proveniente de la energía latente del proceso de evaporación del líquido en el producto, la transferencia radiante del suelo al producto y ganancia solar.

$$\begin{aligned}
 mp * (C_{pp} + C_{pl} * Xp) * \frac{dT_p}{dt} & \quad (2-11) \\
 & = 2 * Ap * hc_{p-a} * (Ta - Tp) * 60 + Ap * hr_{p-c} * (Tc - Tp) * 60 \\
 & + Ap * Dp * \rho p * (C_{pv} * (Ta - Tp) + Lp) * \frac{dXp}{dt} + Af * hr_{f-p} * (Tf - Tp) * 60 \\
 & + Fp * \alpha p * Ac * \tau c * I * 60
 \end{aligned}$$

### 2.3.4 Balance de energía en el suelo

La variación de energía en el suelo corresponde a la ganancia solar, la transferencia convectiva con el aire, la transferencia radiante con el producto y la transferencia radiante con la cubierta.

$$\begin{aligned}
 -kf * Af * \frac{dT_f}{dx} & = (1 - Fp) * \alpha f * Ac * \tau c * I + Af * hc_{f-a} * (Ta - Tf) + Af * hr_{f-p} * (Tp - Tf) \\
 & + Af * hr_{f-c} * (Tc - Tf)
 \end{aligned} \quad (2-12)$$

La variación de energía en el suelo corresponde a la transferencia conductiva con el subsuelo hasta que alcanza un foco de temperatura constante.

$$-kf \cdot Af \cdot \frac{dTf}{dx} = Af \cdot hk_{f-g} \cdot (T\infty - Tf) \quad (2-13)$$

Sin embargo, dichas ecuaciones diferenciales pueden ser expresadas como la transferencia de calor; obteniéndose la temperatura del suelo cuando son conocidas la profundidad y temperatura de foco. Obteniéndose así la siguiente ecuación:

$$(1 - Fp) \cdot \alpha f \cdot Ac \cdot \tau c \cdot I + Af \cdot hc_{f-a} \cdot (Ta - Tf) + Af \cdot hr_{f-p} \cdot (Tp - Tf) + Af \cdot hr_{f-c} \cdot (Tc - Tf) = -kf \cdot Af \cdot \frac{(Tf - T\infty)}{\Delta x} \quad (2-14)$$

$$Tf = \frac{\frac{kf \cdot T\infty}{\Delta x} - \frac{(1 - Fp) \cdot \alpha f \cdot Ac \cdot \tau c \cdot I}{Af} - hc_{f-a} \cdot Ta - hr_{f-p} \cdot Tp - hr_{f-c} \cdot Tc}{\frac{kf}{\Delta x} - hc_{f-a} - hr_{f-p} - hr_{f-c}} \quad (2-15)$$

Como se puede apreciar las ecuaciones energía dependen entre ellas de las incógnitas de la temperatura del aire, temperatura de la cubierta, temperatura del producto y la temperatura del suelo.

## 2.4 Balances de masas

El balance de masas está referido a la masa de agua que son transferidos por unidad de masa del aire seco; ya que estos últimos se mantienen constantes.

La variación de la humedad específica en el aire corresponde a la diferencia entre la entrada y la salida; y al contenido de humedad liberado por el producto durante el proceso.

$$\rho a \cdot Vd \cdot \frac{dW}{dt} = \rho a_{in} \cdot W_{in} \cdot V_{in} \cdot 3600 - \rho a_{out} \cdot W_{out} \cdot V_{out} \cdot 3600 - A_p \cdot D_p \cdot \rho p \cdot \frac{dXp}{dt} \quad (2-16)$$

## 2.5 Modelo secado de una sola capa

Debido a que cada producto, dependiendo de sus características, se seca de manera distinta es necesario obtener datos experimentales que permitan obtener ecuaciones que predigan el proceso de transferencia tanto de calor como de humedad. Al obtener datos experimentales del proceso de secado en una solar capa de un producto, se puede posteriormente, generar la curva característica de secado de cada producto.

Se busca estudiar la resistencia a la transferencia de humedad entre el producto y el aire, al someter al producto a condiciones de secado como son la temperatura del aire, la presión, la velocidad, la humedad relativa y el tiempo de retención del producto. A partir de ciertas derivaciones de la segunda ley de Fick aplicando simplificaciones y emplear contantes es que se logra ajustar los datos obtenidos experimentalmente.

La desventaja de emplear este método predictivo es que los modelos son válidos sólo en las condiciones de secado que se realizaron para cada producto experimentalmente.

Para comprender el comportamiento de transferencia de masa  $\dot{m}$  se relaciona la segunda ley de Fick que cuantifica la transferencia de masa para un gradiente de concentración  $dC/dx$  y propiedad de transporte conocida como difusión  $D$  (ecuación 2-9); con su análoga, la ecuación de Fourier que cuantifica la transferencia de calor  $\dot{Q}$  para un gradiente de temperatura  $dT/dx$  y la propiedad de transporte conocida como conductividad térmica  $k$  (ecuación 2-9).

$$\frac{\dot{Q}}{A} = (-k) \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2-17)$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = (-D) \cdot \frac{dC}{dx} \quad (2-18)$$

Además, análogamente también, la ley de enfriamiento de Newton dice que el flujo de calor por unidad de área y tiempo  $\dot{q}$  de un cuerpo, es proporcional a la diferencia de temperaturas entre dicho cuerpo y su alrededor  $\Delta T$  y el coeficiente convectivo  $h$ .

$$\dot{q} = -h \cdot \Delta T \quad (2-19)$$

Es así como se entiende que la velocidad de secado será proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad real y la de equilibrio.

El producto seleccionado para la validación del modelo del secador solar tipo domo es el ají, chile o *chilli*, un producto comunmente empleado en la gastronomía latinoamericana o asiática; para lo cual se ha empleado las correlaciones del artículo científico de Mohammed Ayub Hossain donde se obtienen las curvas de secado para los parámetros del aire de secado con rangos de temperatura  $T_a$  entre 40-65 para °C, humedad relativa RHD 0.1-0.6 y velocidad del aire  $C$  0.12-1.02 m/s [30]. Su tasa de secado es de:

$$\frac{dX}{dt} = -K \cdot (X - X_e) \quad (2-20)$$

$$K = 0.003484 - 0.000222 * (T_a - 273.15) + 3.66 * (10^{-6}) * ((T_a - 273.15)^2) - 0.007085 * RHD + 0.00572 * (RHD^2) + 0.002738 * C - 0.001235 * (C^2) \quad (2-21)$$

$$X_e = -340.573 + 5.787472 * (T_a - 273.15) - 193.212 * RHD + 238.7285 * (RHD^2) - 22.3649 * C + 32.9542 * (C^2) \quad (2-22)$$

## 2.6 Coeficientes de transferencia de calor

Como se aprecia en los balances de energía antes mencionados dependiendo del tipo de transferencia de calor es necesario contar con los coeficientes convectivos, radiantes y conductivos que se encuentran en función de las temperaturas. Debido a que las temperaturas son las incógnitas del sistema es necesario expresar dichos parámetros en función de esos parámetros.

### 2.6.1 Coeficientes radiantes

Una superficie pierde energía por emisión y gana energía por absorción; siendo la emisión una combinación entre lo que emite y lo que refleja dicha superficie.

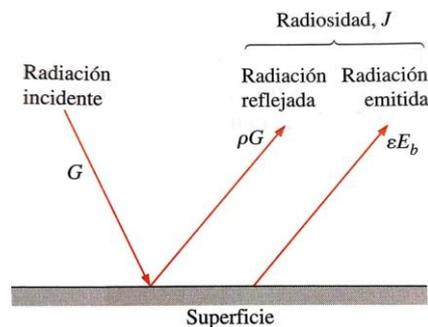


Figura 2-6. Radiosidad conformada por la radiación reflejada y la emitida. [7]

Esta energía total que irradia una superficie por unidad de tiempo y unidad de área se conoce como radiosidad  $J$  [ $W/m^2$ ]. Es así como, la radiosidad de un cuerpo negro es igual a su poder de emisión.

$$J_i = \varepsilon_i \cdot E_{bi} + \rho_i G_i \quad (2-23)$$

$$J_i = \sigma \cdot T_i^4 \quad (2-24)$$

La transferencia neta por radiación de una superficie  $i$  con un área  $A_i$  se conoce como  $Q_i$  [W] y está conformada por la transferencia a  $N$  número de superficies  $j$  que hayan.

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) \quad (2-25)$$

$$\sigma \cdot T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) \quad (2-26)$$

Empleando el método de redes que emplea la analogía con las redes eléctricas para resolver los problemas de transferencia de calor por radiación se obtiene que la transferencia de calor por radiación en recinto cerrado de dos superficies 1 y 2.

$$\dot{Q}_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{12} + R_2} \quad (2-27)$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \cdot \varepsilon_2}} \quad (2-28)$$

Del mismo modo, se emplea el método de redes para un recinto cerrado conformado por tres superficies.

La linealización del intercambio radiante permite hacer que el flujo de calor sea proporcional a una diferencia de temperaturas en lugar de la diferencia cada temperatura elevada a la cuarta potencia, para diferencias de temperaturas no tan altas.

$$(T_1^4 - T_2^4) \cong 4 \left( \frac{T_2 + T_1}{2} \right)^3 (T_2 - T_1) \quad (2-29)$$

### 2.6.1.1 Cubierta del domo (c) - Cielo (s)

Para la obtención del coeficiente radiante entre la cubierta y el cielo es necesario se emplea la equivalencia eléctrica entre dos superficies e interpretar que la transferencia de calor por radiación se da entre la superficie de la cubierta del domo y el área del cielo que es mucho mayor. La temperatura del cielo, se puede aproximar en función de la temperatura ambiente y su emisividad; se verá en el apartado de correlaciones.

$$Q_{rcs} = \sigma * \varepsilon_c * A_c * (T_c^4 - T_s^4) \quad (2-30)$$

$$Q_{rcs} = 4 * \sigma * \varepsilon_c * A_c * Tm_{cs}^3 * (T_c - T_s) \quad (2-31)$$

$$\cdot h_r CS = 4 * \sigma * \varepsilon_c * Tm_{cs}^3 \quad (2-32)$$

$$Tm_{cs} = \frac{T_c + T_s}{2} \quad (2-33)$$

### 2.6.1.2 Interior del domo

En el interior del domo hay cuatro superficies que se encuentran interactuando entre ellas por lo cual es necesario definir los factores de forma. El factor de forma  $F_{ij}$  es un parámetro netamente geométrico que usa la hipótesis de que las superficies son emisoras y reflectoras difusas; por lo tanto corresponde a la radiación que va de la superficie  $i$  a la superficie  $j$ . La cubierta es superficie 1, lado superior del product es superficie 2, lado inferior del product es superficie 3 y el suelo es la superficie 4.

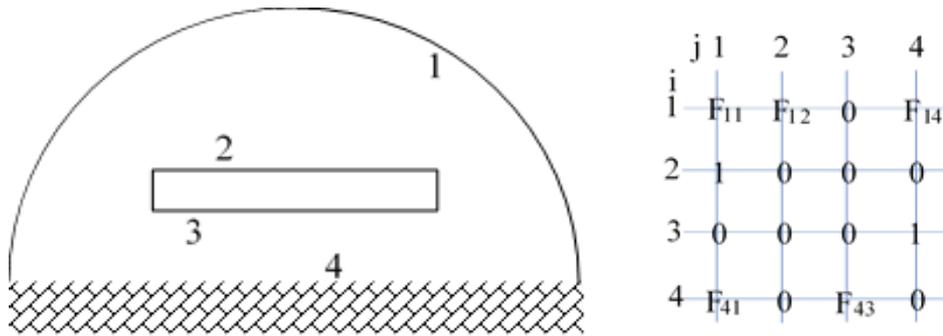


Figura 2-7. Izquierda: superficies en el interior del domo. Derecha: relación de los factores de forma

Se debe aplicar la propiedad de reciprocidad y la regla de la suma dentro del domo, como un recinto cerrado, con la finalidad de despejar los factores de forma restantes.

La propiedad de reciprocidad se expresa de la siguiente forma

$$A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji} \quad (2-34)$$

Mientras que la regla de la suma nos dice la suma de los factores de forma desde una superficie hacia las otras de un recinto cerrado, incluyendo a si misma, debe ser igual a la unidad

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2-35)$$

Con lo que se obtiene para nuestro sistema las siguientes relaciones:

$$F_{43} = \frac{A_3 \cdot F_{34}}{A_4} \quad (2-36)$$

$$F_{41} = 1 - F_{43} \quad (2-37)$$

$$F_{14} = \frac{A_4 \cdot F_{41}}{A_1} \quad (2-38)$$

$$F_{12} = \frac{A_2 \cdot F_{21}}{A_1} \quad (2-39)$$

$$F_{11} = 1 - F_{12} - F_{14} \quad (2-40)$$

2.6.1.2.1 Suelo (4)-producto (3)

$$Q_{rsp} = \frac{4 * \sigma * Tm_{34}^3 * (T_3 - T_4)}{\sum R} \tag{2-41}$$

$$\sum R = \frac{1 - \epsilon_4}{\epsilon_4 * A_4} + \frac{1}{A_4 * F_{34}} + \frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 * A_3} \tag{2-42}$$

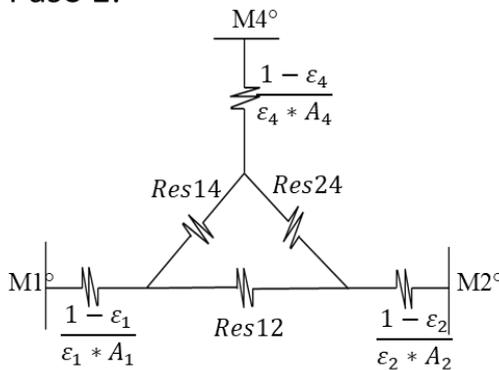
$$hr_{f-p} = \frac{4 * \sigma * Tm_{34}^3}{\sum R * A_3} \tag{2-43}$$

$$Tm_{34} = \frac{T_3 + T_4}{2} \tag{2-44}$$

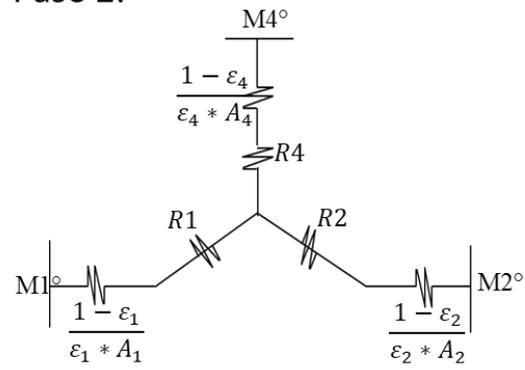
2.6.1.2.2 Cubierta (1)-producto (2)-suelo (4)

La equivalencia eléctrica es una herramienta que permite operar cuando existe transferencia de calor entre tres superficies.

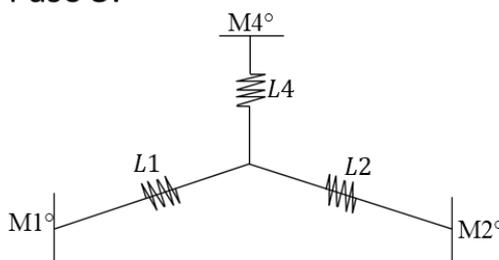
Paso 1:



Paso 2:



Paso 3:



Paso 4:

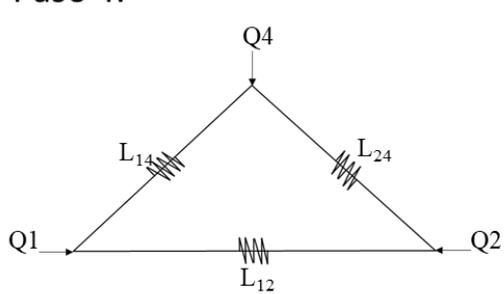


Figura 2-8. Resolución mediante analogía eléctrica

Para el paso 1:

$$Res_{14} = \frac{1}{A_1 * F_{14}} \tag{2-45}$$

$$Res_{24} = \frac{1}{A_2 * F_{24}} \tag{2-46}$$

$$Res_{12} = \frac{1}{A_1 * F_{12}} \quad (2-47)$$

Para el paso 2:

$$R_4 = \frac{\frac{1}{A_1 * F_{14}} * \frac{1}{A_2 * F_{24}}}{\frac{1}{A_1 * F_{14}} + \frac{1}{A_2 * F_{24}} + \frac{1}{A_1 * F_{12}}} \quad (2-48)$$

$$R_2 = \frac{\frac{1}{A_2 * F_{24}} * \frac{1}{A_1 * F_{12}}}{\frac{1}{A_1 * F_{14}} + \frac{1}{A_2 * F_{24}} + \frac{1}{A_1 * F_{12}}} \quad (2-49)$$

$$R_1 = \frac{\frac{1}{A_1 * F_{14}} * \frac{1}{A_1 * F_{12}}}{\frac{1}{A_1 * F_{14}} + \frac{1}{A_2 * F_{24}} + \frac{1}{A_1 * F_{12}}} \quad (2-50)$$

Para el paso 3:

$$L_1 = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 * A_1} + R_1 \quad (2-51)$$

$$L_2 = \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 * A_2} + R_2 \quad (2-52)$$

$$L_4 = \frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4 * A_4} + R_4 \quad (2-53)$$

Para el paso 4:

$$L_{14} = L_1 + L_4 + \frac{L_1 * L_4}{L_2} \quad (2-54)$$

$$L_{24} = L_2 + L_4 + \frac{L_2 * L_4}{L_1} \quad (2-55)$$

$$L_{12} = L_1 + L_2 + \frac{L_1 * L_2}{L_4} \quad (2-56)$$

Una vez obtenida la equivalencia final de intercambio entre las superficies se obtiene:

$$M^\circ = \sigma * T^4 \quad (2-57)$$

$$Q_1 = \frac{1}{L_{12}} * (M1^\circ - M2^\circ) + \frac{1}{L_{14}} * (M1^\circ - M4^\circ) \quad (2-58)$$

$$= \frac{4 * \sigma * Tm12^3 * (T1 - T2)}{L_{12}} + \frac{4 * \sigma * Tm14^3 * (T1 - T4)}{L_{14}}$$

$$Q_2 = \frac{1}{L_{12}} * (M2^\circ - M1^\circ) + \frac{1}{L_{24}} * (M2^\circ - M4^\circ) \quad (2-59)$$

$$= \frac{4 * \sigma * Tm21^3 * (T2 - T1)}{L_{12}} + \frac{4 * \sigma * Tm24^3 * (T2 - T4)}{L_{24}}$$

$$Q_4 = \frac{1}{L_{14}} * (M4^\circ - M1^\circ) + \frac{1}{L_{24}} * (M4^\circ - M2^\circ) \quad (2-60)$$

$$= \frac{4 * \sigma * Tm41^3 * (T4 - T1)}{L_{14}} + \frac{4 * \sigma * Tm42^3 * (T4 - T2)}{L_{24}}$$

- Coeficiente radiante 2-1. Producto-Cubierta:

$$hr_{21} = hr_{p-c} = \frac{4 * \sigma * Tm21^3}{L_{21}} \quad (2-61)$$

- Coeficiente radiante 4-2. Suelo-producto:

$$hr_{24} = hr_{f-p} = \frac{4 * \sigma * Tm24^3}{L_{24}} \quad (2-62)$$

- Coeficiente radiante 4-1. Suelo-Cubierta:

$$hr_{41} = hr_{f-c} = \frac{4 * \sigma * Tm41^3}{L_{41}} \quad (2-63)$$

## 2.6.2 Coeficientes convectivo

La convección es la transferencia de calor a través de un fluido; dependiendo del movimiento del fluido esta se puede clasificar en natural o forzada. Este tipo de transferencia se considera complicada porque involucra la conducción de calor, así como el propio movimiento del fluido, sin embargo, este último mejora la transferencia de calor. Este tipo de transferencia depende así de las propiedades del fluido como la viscosidad dinámica  $\mu$  conductividad térmica  $k$ , densidad  $\rho$ , calor específico  $C_p$  y su velocidad  $V$ , los cuales pueden ser expresados en función de la temperatura como se verá en el apartado de correlaciones.

La ecuación de la ley de enfriamiento Newton (2-11), que se revisó en el apartado de secado de una sola capa emplea a un coeficiente de transferencia que es “*la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura*”. [7]

Para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección se debe saber la distribución de temperatura dentro del fluido. Es así como, empleando los números adimensionales se puede reducir el número de variables empleadas.

El número adimensional de Nusselt es el que generalmente se usa para hallar el coeficiente convectivo en función de la conductividad térmica del fluido  $k$  y la distancia característica  $L_c$ .

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (2-64)$$

Además, el número adimensional de Prandtl corresponde a la difusividad molecular de la cantidad de movimiento  $\mu \cdot C_p$ , entre la difusividad molecular de calor  $k$ , es decir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (2-65)$$

Finalmente, el número de Reynolds que describe el tipo de flujo laminar o turbulento del fluido con el que se está trabajando. Lo que representa las fuerzas de inercia  $\rho \cdot V \cdot Lc$  entre las fuerzas viscosas  $\mu$ .

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot Lc}{\mu} \quad (2-66)$$

Es común el empleo de datos experimentales para expresar el número de Nusselt en función del número de Reynolds y el número de Prandtl; estas correlaciones dependen del tipo de flujo y la configuración geométrica empleada.

Para el modelo térmico de un secador tipo domo es necesario emplear dichas correlaciones con la finalidad de obtener el coeficiente convectivo para las distintas transferencias en el sistema.

#### 2.6.2.1.1 Coeficiente convectivo cubierta-ambiente

Para obtener este coeficiente se ha considerado emplear la correlación de convección forzada de un flujo externo en una esfera [31]. En donde el número de Reynolds dependerá de la velocidad del viento exterior  $vv$ , propiedades del aire en función de la temperatura ambiente  $Tamb$  y la longitud característica que es el diámetro del domo  $Ld$ . El número de Prandtl depende de las propiedades del aire en función de la temperatura ambiente  $Tamb$ ; se verá en el apartado de correlaciones. Y la conductividad térmica del térmica del aire ambiente.

$$Re = \frac{\rho a \cdot vv \cdot Ld}{\mu} \quad (2-67)$$

$$hc_{c-amb} = (2 + (0.48 \cdot (Re^{1/2}) + 0.06 \cdot (Re^{2/3})) \cdot (Pr^{0.4}) \cdot ((\frac{\mu}{\mu_s})^{1/4})) \cdot ka/Ld \quad (2-68)$$

#### 2.6.2.1.2 Coeficiente convectivo producto-aire del domo

Para obtener este coeficiente se ha considerado emplear la correlación de convección forzada, para flujo externo, placa plana y flujo paralelo [31]. En donde el número de Reynolds dependerá de la velocidad del aire de secado al interior del domo, propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $Ta$  y la longitud característica es la longitud de la bandeja donde está colocado el producto  $Lb$ . El número de Prandtl depende de las propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $Ta$ , que se verá en el apartado de correlaciones. Y la conductividad térmica del aire dentro del domo.

$$RePA = \frac{\rho ad \cdot C \cdot Lb}{\mu d} \quad (2-69)$$

$$hc_{p-a} = 0.664 \cdot RePA^{1/2} \cdot Prd^{1/3} \cdot kad/Lb \quad (2-70)$$

#### 2.6.2.1.3 Coeficiente convectivo suelo-aire del domo

Para obtener este coeficiente se ha considerado emplear la correlación de convección forzada, para flujo externo, placa plana y flujo paralelo [31]. En donde el número de Reynolds dependerá de la velocidad del aire de secado al interior del domo, propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $Ta$  y la longitud característica es la longitud del diámetro del domo a la mitad  $Ld/2$ , que es la longiud que atraviesa el aire por el suelo aproximadamente. El número de Prandtl depende de las propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $Ta$ , que se verá en el apartado de correlaciones. Y la conductividad térmica del aire dentro del domo.

$$ReFA = \frac{\rho ad \cdot C \cdot \frac{Ld}{2}}{\mu d} \quad (2-71)$$

$$hc_{f-a} = 0.664 \cdot ReFA^{\frac{1}{2}} \cdot Prd^{\frac{1}{3}} \cdot kad / (\frac{Ld}{2}) \quad (2-72)$$

### 2.6.2.1.4 Coeficiente convectivo cubierta-aire del domo

Para obtener este coeficiente se ha considerado emplear la correlación de convección forzada, para flujo externo, placa plana y flujo paralelo [31]. En donde el número de Reynolds dependerá de la velocidad del aire de secado al interior del domo, propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $T_a$  y la longitud característica es la longitud del arco de la cubierta del suelo al centro superior  $\pi L_d/4$ , que es la longitud que atraviesa el aire por la parte interior de la cubierta. El número de Prandtl depende de las propiedades del aire en función de la temperatura del aire al interior del domo  $T_a$ , que se verá en el apartado de correlaciones. Y la conductividad térmica del aire dentro del domo.

$$Re_{CA} = \frac{\rho_{ad} \cdot C \cdot \frac{\pi \cdot L_d}{4}}{\mu d} \quad (2-73)$$

$$hc_{c-a} = 0.664 \cdot Re_{CA}^{\frac{1}{2}} \cdot Prd^{\frac{1}{3}} \cdot kad / \left( \frac{\pi \cdot L_d}{4} \right) \quad (2-74)$$

## 2.7 Correlaciones en función de la temperatura

Las propiedades termodinámicas del aire húmedo como el calor específico a presión constante  $C_p$  [kJ/(kg.K)], viscosidad dinámica  $\mu$  [Ns/(m<sup>2</sup>)], la densidad [Kg/m<sup>3</sup>] y conductividad térmica  $k$  [W/(m.K)] pueden ser expresadas en función de la temperatura a la que se encuentren. Para obtener dichas correlaciones se ha construido cada gráfica en función de las temperaturas y las humedades relativas [decimal] a la que se encuentre el aire.

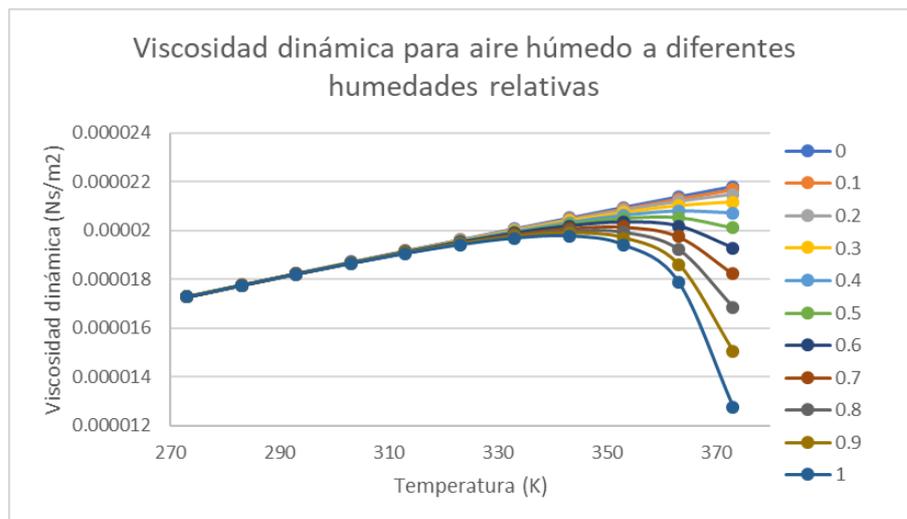


Figura 2-9. Viscosidad dinámica del aire húmedo a diferentes humedades relativas

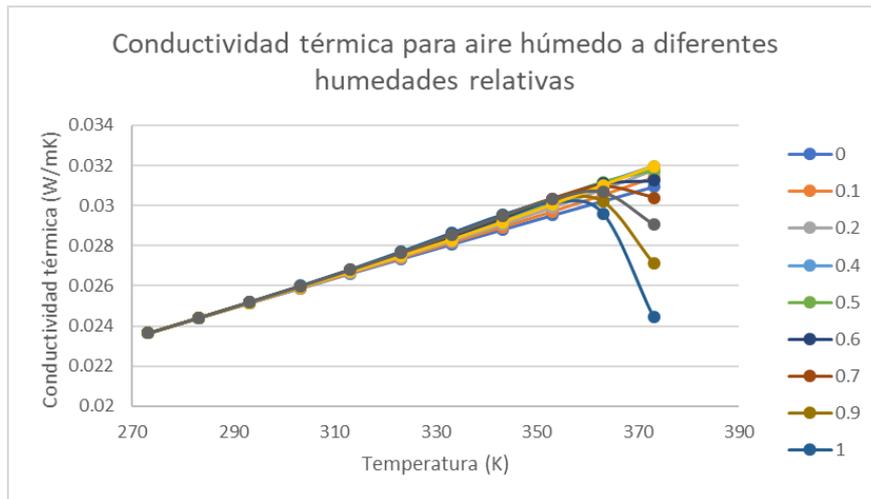


Figura 2-10. Conductividad térmica del aire húmedo a diferentes humedades relativas

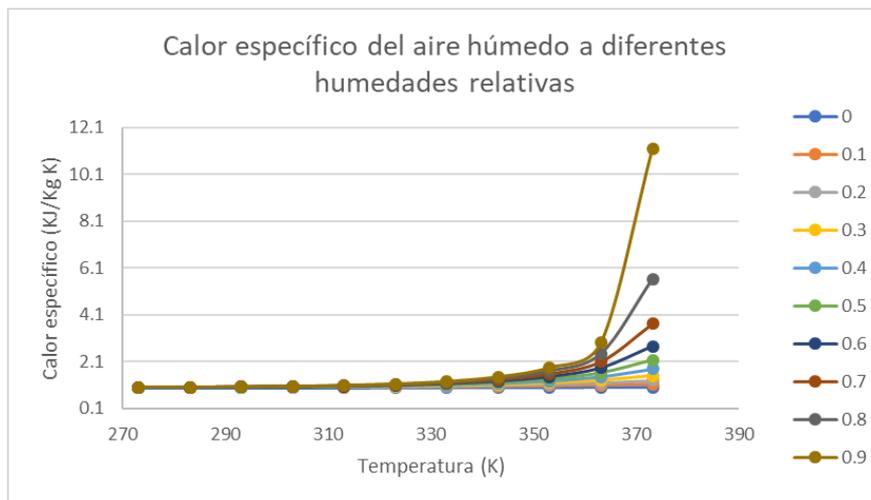


Figura 2-11. Calor específico del aire húmedo a diferentes humedades relativas

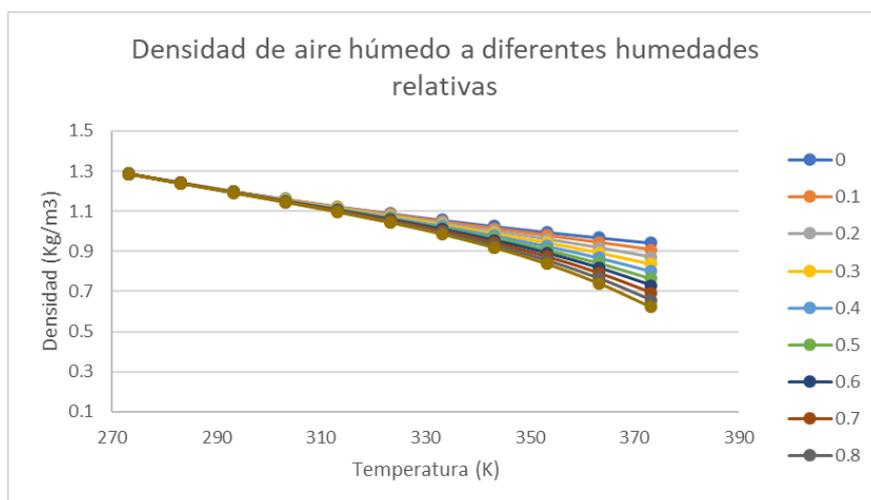


Figura 2-12. Densidad del aire húmedo a diferentes humedades relativas

Como se puede apreciar en las gráficas, para temperaturas por debajo de los 340 K, las propiedades del aire húmedo no se ven significativamente influenciadas por la humedad relativa a la que se encuentra. Es así como, se ha empleado una correlación polinómica para cada propiedad que se podrá usar en función de la temperatura ambiente exterior al domo y temperatura del aire al interior del domo,  $T_{amb}$  o  $T_a$  respectivamente.

$$\begin{aligned} \mu = & -3.20513 * (10^{(-16)}) * T^5 + 4.94267 * (10^{(-13)}) * T^4 - 3.04899 \\ & * (10^{(-10)}) * T^3 + 9.39743 * (10^{(-8)}) * T^2 - 1.44159 \\ & * (10^{(-5)}) * T + 8.93198 * (10^{(-4)}) \end{aligned} \quad (2-75)$$

$$\begin{aligned} k_a = & -3.84615 * (10^{(-13)}) * T^5 + 6.10079 * (10^{(-10)}) * T^4 - 3.84677 \\ & * (10^{(-7)}) * T^3 + 1.20623 * (10^{(-4)}) * T^2 - 1.87462 * (10^{(-2)}) \\ & * T + 1.17276 \end{aligned} \quad (2-76)$$

$$\begin{aligned} C_{pa} = & (1.94872 * (10^{(-9)}) * T^5 - 3.03908 * (10^{(-6)}) * T^4 + 1.89319 \\ & * (10^{(-3)}) * T^3 - 5.88766 * (10^{(-1)}) * T^2 + 9.13974 * (10^{(1)}) \\ & * T - 5.66422 * (10^{(3)})) * 1000 \end{aligned} \quad (2-77)$$

$$Pr = C_{pa} * m_{hu}/k_a \quad (2-78)$$

## 2.8 Metodología

El modelo de comportamiento térmico del secador está compuesto por un sistema de cinco ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE), con el tiempo como una variable independiente. Para resolverlo, se ha utilizado el sistema de cómputo numérico MATLAB, que tiene varios algoritmos ODE donde se debe ingresar la función que contiene las ecuaciones diferenciales; correlaciones dependientes de las variables desconocidas o variables de salida; el valor de contenido de humedad a alcanzar requerido, para finalizar la simulación; y las condiciones de inicio para cada una de las incógnitas planteadas. Se seleccionó el uso del ode15s que cuenta con una precisión entre baja y media, pero emplea un tiempo reducido para resolver el sistema de ecuaciones.

Por lo tanto, el modelo térmico cuenta con variables de entrada, intermedias y de salida. Las variables de entrada son datos meteorológicos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa del aire ambiente, la temperatura del cielo, la humedad absoluta del aire ambiente y la velocidad del viento de un año meteorológico típico (TMY), en este caso de Sevilla; la velocidad del aire de secado que pasa por el producto; la cantidad de masa seca del producto y el contenido de humedad del producto inicialmente. En caso, el TMY no contenga toda la información es posible obtener el valor aproximado de la humedad absoluta del aire y la temperatura del cielo en función de la humedad relativa y la temperatura del aire del ambiente.

Las variables intermedias son todas aquellas que dependen de las temperaturas, que son incógnitas, como las propiedades de transporte del aire húmedo y los coeficientes de transferencia de calor; es así que fue necesario expresar estas variables intermedias en función de las incógnitas.

Finalmente, el sistema entregará las variables de salida que el contenido de humedad en el producto expresado en base seca para cada instante del tiempo, la temperatura de la cubierta del domo, la temperatura del aire al interior del domo, la temperatura del producto dentro del domo y la humedad relativa del aire a la salida de domo.

Además, se considera que las propiedades y la geometría de la cubierta, el producto y el suelo son invariables. Para la cubierta, se ha empleado el valor de polietileno de baja densidad de 0.0015 m de espesor, que tiene propiedades como una densidad de 920 kg/m<sup>3</sup> y un calor específico promedio de 2100 J/(kg K) [32]. Se han utilizado para el producto valores de densidad promedio de 103.99 kg/m<sup>3</sup> y calor específico de 2525 J/(kg K) [33]. Para los valores de calor específicos del vapor y líquido dentro del producto; y el calor latente del líquido evaporado del producto, se han usado correlaciones dependiendo de la temperatura del producto [31]. Para el cálculo del área que ocupa el producto, consideramos 10 kg de producto por metro cuadrado y un espesor del ají de 0.05 m. Además, se considera que el producto a utilizar son los ajíes o chiles que tienen un contenido de humedad inicial de 270% db y generalmente se consideran secos cuando alcanzan un contenido de humedad final entre 10 % db [30].

Además, para la transferencia térmica de calor a través del suelo, se ha utilizado una conductividad térmica promedio de  $0.4 \text{ W/(m K)}$  [34] así como una distancia de 14 m de profundidad y una temperatura constante del aproximada de  $22 \text{ }^\circ \text{C}$  del foco en el subsuelo [35].

Para los parámetros ópticos, una absorptividad de la cubierta de 0.1, una absorptividad de producto de 0.7, una transmisividad de la cubierta de 0.3, una absorptividad del suelo de 0.6, una emisividad de la cubierta de 0.4, una emisividad del producto de 0.7 y una emisividad del suelo de 0.4.

### 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

*“La Tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las necesidades de cada hombre, pero no la codicia de cada hombre.”*

*- Mahatma Ghandi -*

El modelo térmico, como se ha mencionado anteriormente, cuenta con variables de entrada, intermedias y de salida. Las variables de entrada son datos meteorológicos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa del aire ambiente, la temperatura del cielo, la humedad absoluta del aire ambiente y la velocidad del viento de un año meteorológico típico (TMY), que depende del lugar donde se llevará a cabo la simulación, en este caso de Sevilla; la velocidad del aire de secado que pasa por el producto propuesta por uno mismo; la cantidad de masa seca del producto y el contenido de humedad del producto inicialmente. En caso, el TMY no contenga toda la información es posible obtener el valor aproximado de la humedad absoluta del aire y la temperatura del cielo en función de la humedad relativa y la temperatura del aire del ambiente.

Las variables intermedias son todas aquellas que dependen de las temperaturas u otra variable que sea incógnita, como las propiedades de transporte del aire húmedo y los coeficientes de transferencia de calor; es así que fue necesario expresar estas variables intermedias en función de las incógnitas.

El sistema entregará las variables de salida que el contenido de humedad en el producto expresado en base seca para cada instante del tiempo, la temperatura de la cubierta del domo, la temperatura del aire al interior del domo, la temperatura del producto dentro del domo y la humedad relativa del aire a la salida de domo.

Considerando la información requerida para el modelado, en este capítulo, se muestran los resultados obtenidos de resolver el modelado térmico de un secador tipo domo para el secado de ajíes. Dichos resultados se representan en gráficos para visualizar la variación de las temperaturas, contenido de humedad del aire a la salida del domo y contenido de humedad del producto en función del tiempo; de esta manera se puede lograr comparar la influencia de los parámetros seleccionados en el tiempo que lleva secar el producto hasta lograr un contenido de humedad en base seca de 10%. Siendo el valor de 10% de contenido de humedad del producto el valor mínimo al que se quiere llegar y una vez alcanzado la simulación se detendrá.

Tanto para el caso base, como para los análisis de sensibilidad posteriores, se muestran diferentes parámetros como lo son temperaturas, radiación global horizontal, entre otros versus el tiempo en minutos. Es así que, se ha simulado el comportamiento del secador tipo domo empleándolo 10 horas al día durante el mes de abril, igual que en el mes de Junio; mientras que para el mes de febrero se emplearon 6 horas al día, por ser un mes más nublado.

### 3.1 Caso base

Para poder realizar el estudio del comportamiento térmico de un secador tipo domo fue necesario establecer un caso base, en este se emplean parámetros invariables que deben ser proporcionados por el investigador como lo son la geometría del domo; las propiedades y la geometría de la cubierta, el producto y el suelo.

Sobre el secador, se establece que el análisis se realiza para un secador tipo domo de 5 metros de diámetro y 2.5 metros de altura en su centro. Para la cubierta, se ha empleado el valor de polietileno de baja densidad de 0.0015 m de espesor, que tiene propiedades definidas como una densidad de 920 kg/m<sup>3</sup> y un calor específico promedio de 2100 J/(kg K) [32].

Por otro lado, para el cálculo del área que ocupa el producto, consideramos una densidad de superficie de 10 kg de producto por metro cuadrado y un espesor del ají de 0.05 m. Es así que se establece que para el caso base se colocará 74 kg de ajíes que se considera tienen un contenido de humedad inicial de 270% db y 20 kg de masa seca. Se han utilizado para el producto, en este caso el ají, valores de densidad promedio de 103.99 kg/m<sup>3</sup> y calor específico de 2525 J/(kg K) [33]. Para los valores de calor específicos del vapor y líquido dentro del producto; y el calor latente del líquido evaporado del producto, se han usado correlaciones dependiendo de la temperatura del producto que se propusieron en el apartado 2.7 Correlaciones en función de la temperatura [31].

Además, para la transferencia térmica de calor a través del suelo, se ha utilizado una conductividad térmica promedio de 0.4 W/(m K) [34] así como una distancia de 14 m de profundidad y una temperatura constante del aproximada de 22 ° C del foco en el subsuelo a partir de investigación previa realizada [35].

Para los parámetros ópticos, se han elegido, una absorptividad de la cubierta de 0.1, una absorptividad de producto de 0.7, una transmisividad de la cubierta de 0.3, una absorptividad del suelo de 0.6, una emisividad de la cubierta de 0.4, una emisividad del producto de 0.7 y una emisividad del suelo de 0.4.

Finalmente, para las variables de entrada es necesario trabajar con los datos del año meteorológico típico del lugar donde se evaluará la simulación, en este caso para Sevilla durante el mes de abril, considerando 10 horas de operación del secador por día. Ya que se consideran secos los ajíes cuando alcanzan un contenido de humedad final entre 10 % db [30], este será el valor con el cual se detendrá la simulación una vez alcanzado.

Una vez planteados todos los parámetros invariables, así como los datos de entrada; se emplea el sistema de cómputo numérico Matlab para solucionar el sistema de ecuaciones para el caso base.

Es así que se obtiene la evolución temporal de las condiciones exteriores como la temperatura ambiente y radiación solar global; así como las temperaturas del producto, de la cubierta y del aire en el interior del domo que se presentan en la Figura 3-1. En esta se observa que los distintos componentes que conforman el secador alcanzan temperaturas distintas. En el primer y segundo día los resultados son similares, el aire al interior del domo alcanza una temperatura de 314 K (la más alta), seguida por la de la cubierta con 307 K y finalmente la del producto con 302 K, en promedio. Este comportamiento similar en ambos días responde a niveles de radiación semejantes en ambos días a comparación del tercero.

Además, se puede observar que la temperatura del producto es casi constante especialmente durante el primer y segundo día de secado; esto responde a la inercia térmica por la cantidad de líquido que aún hay en su interior. Sin embargo, en el tercer día de secado, el aire al interior del domo alcanza los 320 K, la cubierta llega a los 312 K y el producto alcanza los 310 K. Estos valores más elevados (delta de 6 grados) responden a una mayor cantidad de radiación solar durante este día; mientras que, en el caso del producto, la elevación también corresponde a la disminución significativa del contenido de humedad en el interior, permitiendo elevar su temperatura en un delta de 8 grados de temperatura.

Por otro lado, en la Figura 3-1 se puede identificar que, si en promedio el aire del ambiente alcanza una temperatura pico promedio de 295 K para los 3 días de secado, el aire dentro del domo puede alcanzar una temperatura pico promedio de 316 K, es decir una diferencia de hasta 21° durante el día.

Finalmente, se observa además que existe una inercia térmica en los componentes dentro del domo, así como del aire ambiente; que se manifiesta por el desfase hacia la derecha en los picos de las curvas de temperatura que no se dan al mismo tiempo del pico de la radiación solar.

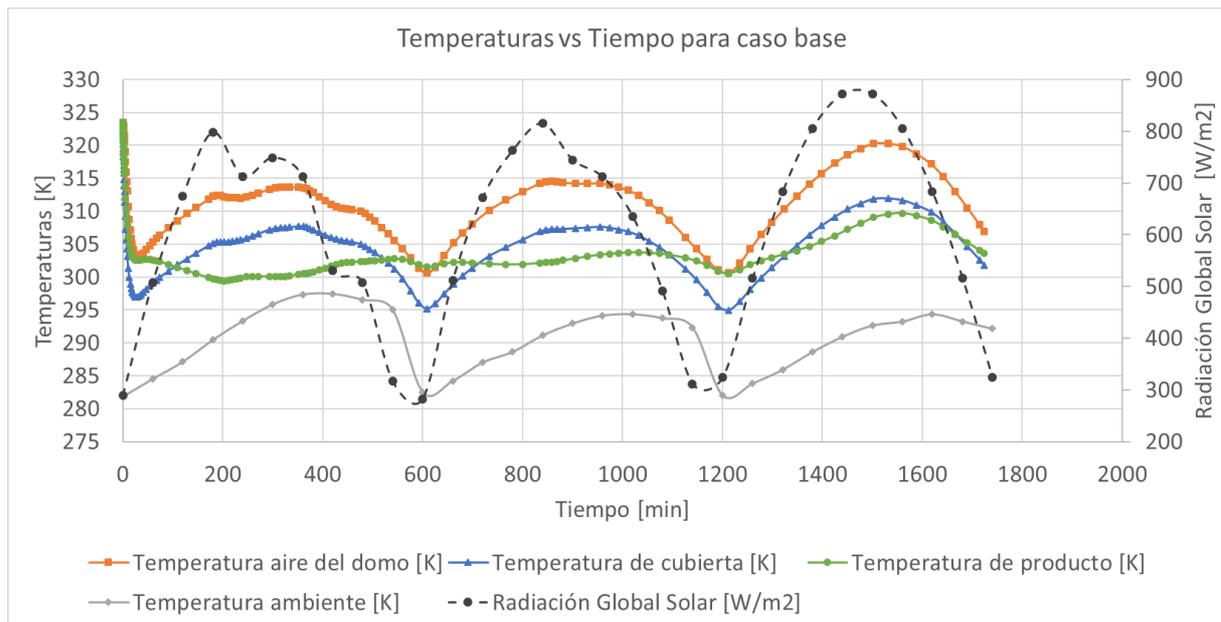


Figura 3-1. Temperaturas y radiación solar vs tiempo para el caso base

Además, se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca, la humedad relativa del aire a la entrada y a la salida del domo en la Figura 3-2. En esta se identifica que el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad en el producto alrededor de 10%, valor óptimo para considerar el producto seco, es de 28.73 horas. El primer día la variación del contenido de humedad del producto es de 102 kg H<sub>2</sub>O/kg producto seco, el segundo es de 82 kg H<sub>2</sub>O/Kg producto seco y el tercer día es de 76 kg H<sub>2</sub>O/Kg producto seco. Esto se debe a que a medida se va secando el producto, la extracción de humedad es más complicada ya que la humedad debe viajar desde el interior del producto a la superficie.

Por otro lado, en la Figura 3-2 se aprecia la humedad relativa la entrada del domo, que corresponde a la humedad relativa del ambiente y la humedad relativa a la salida del domo. Considerando que el aire dentro del domo se calienta, este a su vez, disminuye en su humedad relativa; para posteriormente, absorber el contenido de humedad el producto. Es así como, en Figura 3-2 se aprecia que la humedad relativa a la salida no se encuentra por encima de la entrada; a la salida del domo, el aire alcanza un pico promedio de 30% de humedad relativa mientras que en el exterior se tiene el aire a 80% de humedad relativa.

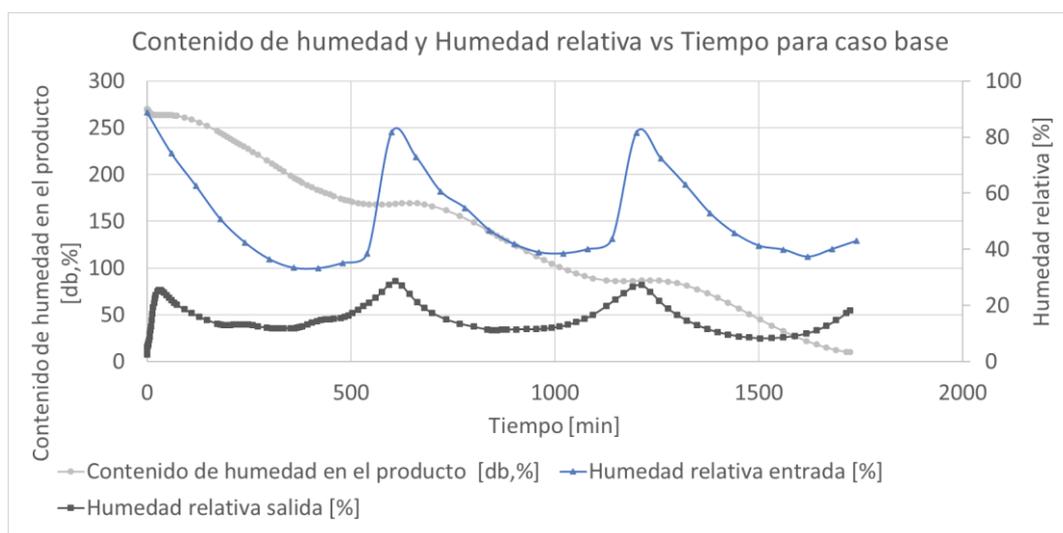


Figura 3-2. Contenido de humedad del producto y humedad relativa vs tiempo para el caso base

Finalmente, se puede observar en la Figura 3-3 que la variación del contenido de humedad en el producto tiene una mayor pendiente cuanto mayor es la radiación durante el día; mientras que al tener una radiación solar por debajo de los 300 W/m<sup>2</sup>, el contenido de humedad en el producto se mantiene casi constante y por debajo de estos valores se simula que el secador no está operando.

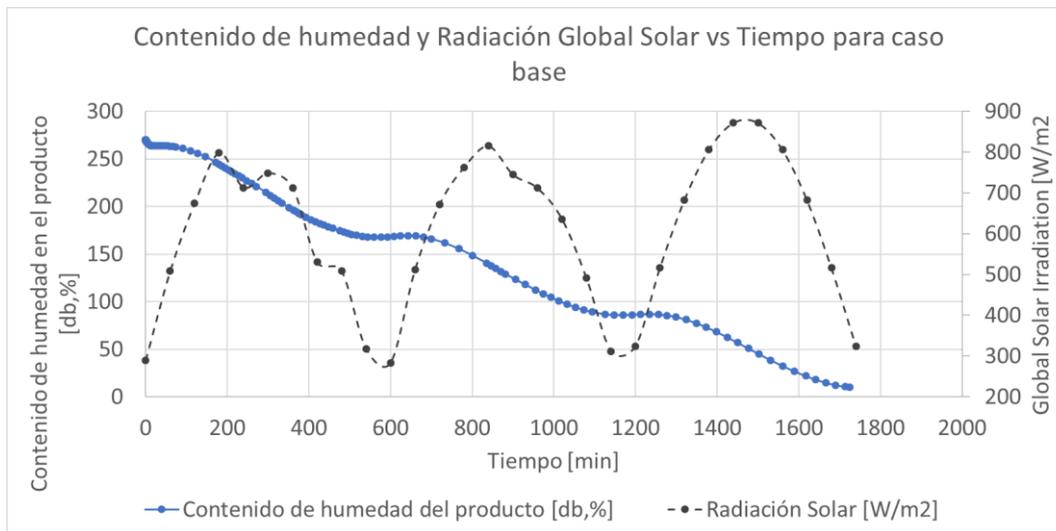


Figura 3-3. Contenido de humedad del producto y radiación solar vs tiempo para el caso base

Como el secador en el mes de abril, que es el mes seleccionado para el caso base, funciona por 10 horas al día; se puede considerar que son necesarios 28.73 horas o aproximadamente 3 días de funcionamiento para secar 74 kg de ajíes; lo que equivale a 20 kg de ajíes secos para un contenido de humedad de 270 % d.b., inicialmente.

Posteriormente, de evaluado el caso base, se realiza un análisis de sensibilidad con la finalidad de identificar el efecto de variar parámetros relacionados con el proceso de secado. Entre los parámetros más significativos se encuentran la velocidad del aire de secado para lo cual se propone utilizar los valores de 0.2, 0.4, 0.8, 1 y 1.2 m/s; la cantidad de masa seca del producto con 10 kg y 30 kg que se coloca en el domo, esto en proporción con el contenido de humedad representa la cantidad de masa total de ajíes; la transmisividad de la cubierta 0.2 y 0.3 que puede verse afectado por la calidad del material empleado, así como la presencia de polvo; y finalmente el empleo del modelado para dos meses diferentes, febrero y junio.

### 3.2 Análisis de sensibilidad de velocidad de secado

Uno de los parámetros que influyen directamente en las ecuaciones de las curvas de secado utilizadas para el ají [15] es la velocidad del aire que atraviesa el producto, por dicho motivo se probaron diferentes velocidades que van desde 0.2 m/s a 1.2 m/s.

Se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la radiación solar global en la Figura 3-4. En primer lugar, se puede observar que la velocidad de secado influye en el tiempo requerido para que el producto alcance un contenido de humedad de 10% db. Para las velocidades de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2 el tiempo requerido en horas es de 43.7, 35, 28.7, 26.2, 25.7, 26.6, respectivamente. Esto se debe a que el contenido de humedad varía directamente de este parámetro, por ejemplo, para el primer día, con dichas velocidades la variación del contenido de humedad del producto es de 70, 86, 102, 114, 119, 114 kg H<sub>2</sub>O/kg de producto seco respectivamente; en donde a mayores velocidades se puede alcanzar mayor extracción de contenido de humedad.

Por otro lado, se puede ver que cuando la velocidad de secado en el producto es baja, de 0.2 m/s; el aire húmedo que ingresa al domo hace que el contenido de humedad en el producto aumente en lugar de disminuirlo para las horas de menor radiación. Este resultado invita a evaluar no usar el domo durante estos intervalos de tiempo para velocidades de secado muy bajas. Esto hace que el tiempo de secado alcance el 10% de contenido de

humedad, con una velocidad de 0.2 m/s, de 43.72 horas, 4.5 días de funcionamiento del equipo.

Por otro lado, a medida que la velocidad de secado es mayor, el tiempo de secado se reduce, por ejemplo, con 0.6 m/s el tiempo requerido es de 28.73 horas; mientras que, para velocidades más altas se observa que no hay una reducción considerable en el tiempo, esto puede deberse a la ratio de secado del producto en sí, ya que no es posible evaporar más, aunque la velocidad aumente. El tiempo de secado necesario para velocidades de 0.8, 1, 1.2 m/s en promedio es de 26.22 horas, sin embargo, se observa que la mayor velocidad de secado no entrega el menor tiempo de secado, sino este se alcanza con una velocidad de 1 m/s.

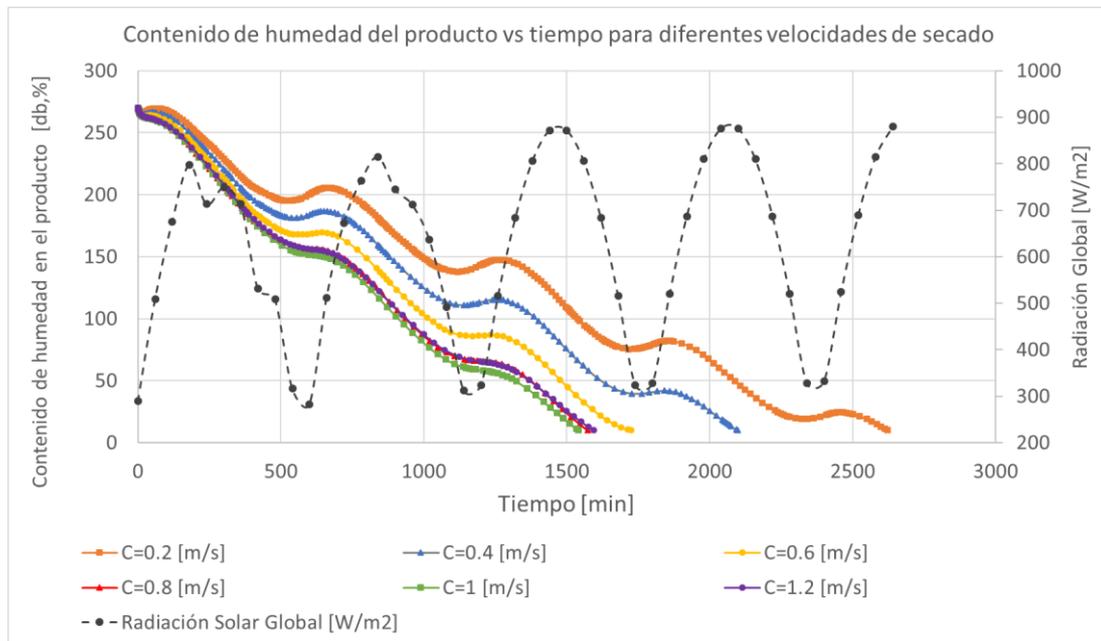


Figura 3-4. Contenido de humedad del producto e irradiación solar global frente al tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.

Se ha considerado apropiado también representar gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la humedad relativa a la salida del domo en la Figura 3-5. En esta se observa que a medida que aumenta la velocidad de secado, también aumenta la humedad relativa del aire a la salida del domo. En el primer día, se tiene que la humedad relativa a la salida del domo es de 10% contenido de humedad para durante el tiempo de extracción (mayor pendiente del contenido de humedad) para una velocidad de 0.4 m/s; mientras que para el mismo instante el contenido de humedad es de 15% db para las velocidades de 1 y 1.2 m/s. Así mismo, cuando el contenido de humedad presenta una pendiente casi horizontal, es cuando se alcanzan mayores humedades relativas a la salida; alcanzando un máximo del 37% para velocidades de 1 y 1.2 m/s, mientras que, durante el mismo instante de tiempo, para una velocidad de 0.4 m/s solo se alcanza el 23%. Además, se observa que para velocidades de secado mayores a 0.8 existe un máximo de humedad relativa a la salida que se puede alcanzar, esto se relaciona con el máximo de contenido de humedad que puede ir liberando el producto.

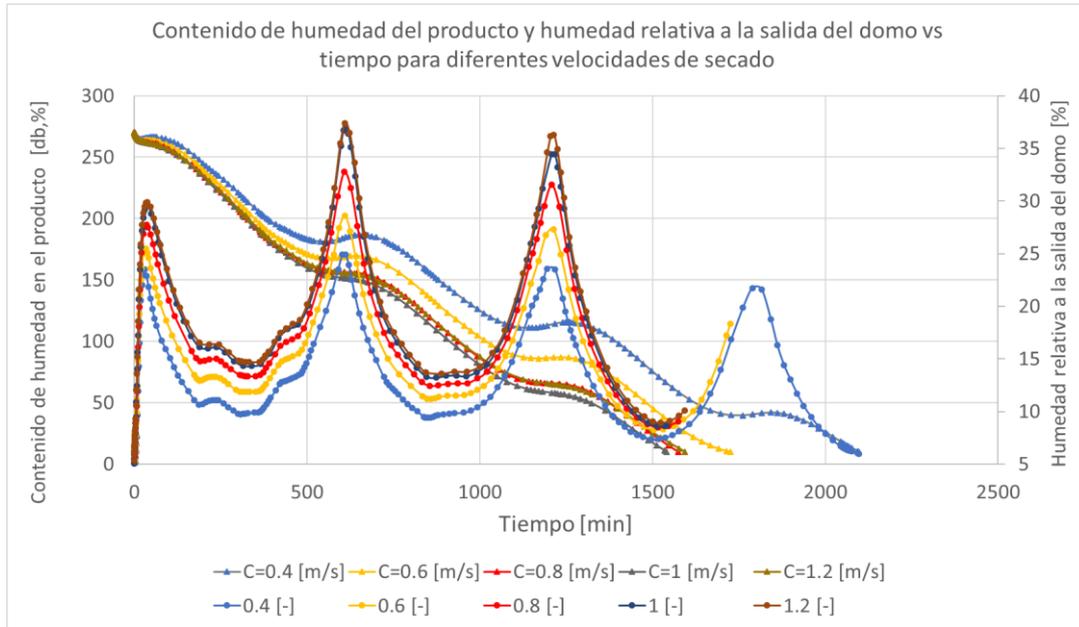


Figura 3-5. Contenido de humedad en el producto y humedad relativa a la salida del domo vs tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.

Finalmente, se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la temperatura del aire dentro del domo en la Figura 3-6. Generalmente se considera que el aumento de la velocidad el aire disminuye la temperatura dentro del domo como una estrategia interesante para lograr controlar las temperaturas requerida con la finalidad de no dañar las propiedades del ají. Sin embargo, como se observa en la Figura 3-6 la temperatura disminuye al aumentar la velocidad del aire de secado, pero a partir de los 0.8 m/s dicha temperatura no disminuye significativamente. Por ejemplo, para el primer día, la temperatura pico obtenida es de 315 K, 313 K, 312 K, 311 K, 311 K para una velocidad de 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, respectivamente.

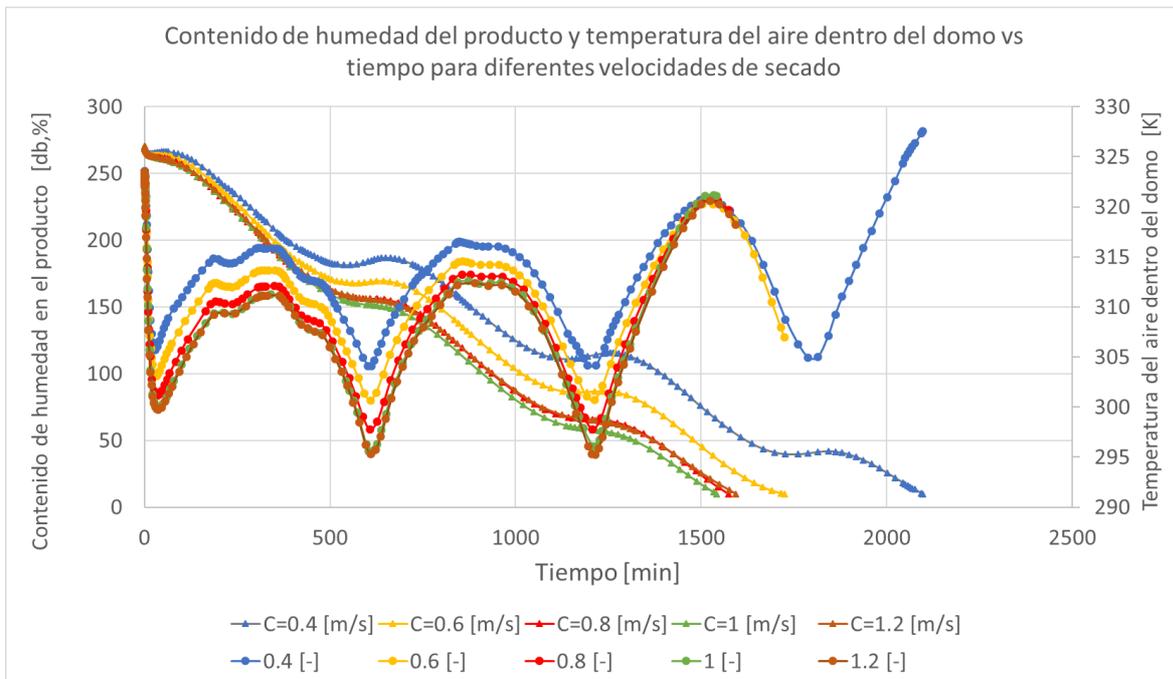


Figura 3-6. Contenido de humedad en el producto y temperatura del aire dentro del domo vs tiempo para diferentes velocidades de aire de secado.

### 3.3 Análisis de sensibilidad de la masa seca del producto.

Otro parámetro por considerar es la cantidad de producto en el domo en el momento inicial, este parámetro se calculó a partir del porcentaje de contenido de humedad inicial que es 270% y la cantidad de masa seca del producto que no cambia con el tiempo.

Por lo tanto, se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la radiación solar global en la Figura 3-7. que el tiempo de secado también depende de la cantidad de producto para 10 kg de masa seca del producto necesario 22.7 horas, para 20 kg de masa seca del producto 28.7 horas, mientras que para 30 kg es necesario 36.9 horas. En el primer día, la variación del contenido de humedad para una masa seca inicial de 10 kg fue de 149 kgH<sub>2</sub>O/kg de producto seco; para 20 kg fue de 102 kgH<sub>2</sub>O/kg de producto seco y para 30 kg fue de 78 kgH<sub>2</sub>O/kg de producto seco.

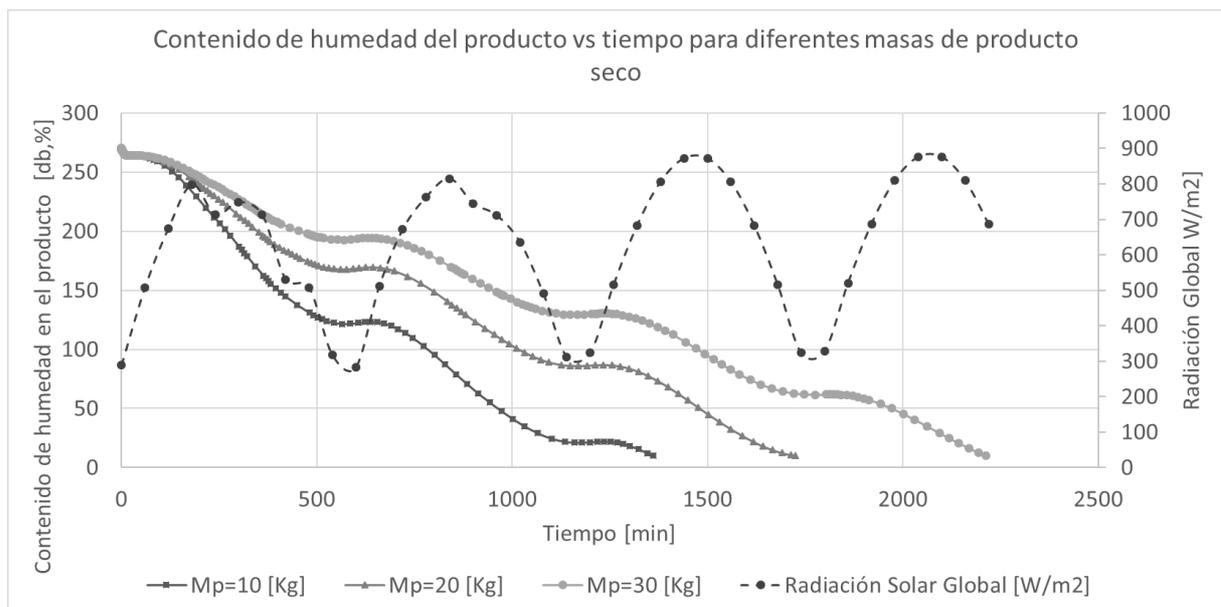


Figura 3-7. Contenido de humedad del producto e irradiación solar global frente al tiempo para diferentes masas de producto seco.

### 3.4 Análisis de sensibilidad de la transmisividad de la cubierta.

Otro parámetro importante es la transmisividad de la cubierta, que depende del material utilizado o también la presencia de polvo sobre la propia cubierta. En general, los materiales como el plástico tienen una baja transmisividad, por lo que el caso base se compara con las transmisividades de 0.2 y 0.4.

Como en los casos anteriores se ha necesario representar gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la radiación solar global en la Figura 3-8. Para una transmisividad de cubierta de 0.2 se obtiene un mayor tiempo de secado de 56.1 horas, mientras que se logra una mayor transmisividad de 0.4 para reducir el tiempo a 21.53 horas, a comparación del tiempo requerido de 28.7 horas para una transmisividad de 0.3. Para el primer día se obtiene que la variación del contenido de humedad fue de 215 kg H<sub>2</sub>O/kg de producto seco, 167 kg H<sub>2</sub>O/kg de producto seco y 123 kg H<sub>2</sub>O/kg de producto seco para una transmisividad de cubierta de 0.2, 0.3 y 0.4 respectivamente.

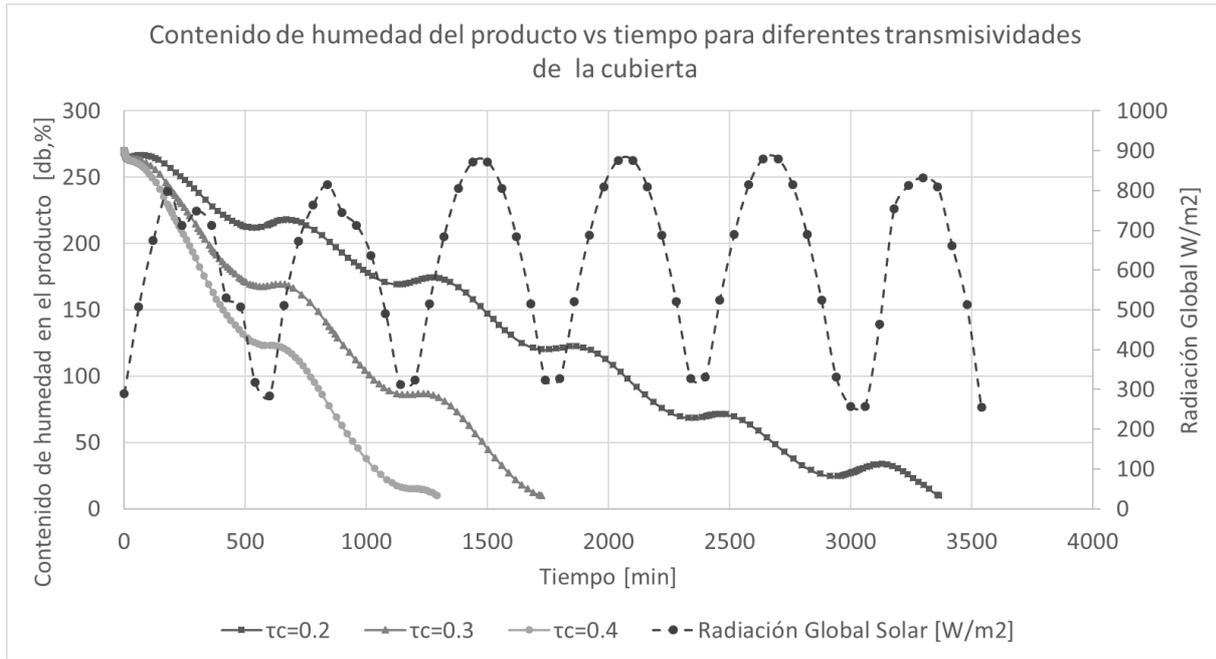


Figura 3-8: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global en función del tiempo para una transmitancia de cobertura diferente.

### 3.5 Análisis de sensibilidad para otros meses del año.

También es interesante revisar el comportamiento térmico del domo para otros meses del año empleando el modelado desarrollado. Para el mes de febrero en Sevilla, se utilizaron 6 horas a partir del 3 de febrero para la simulación. A continuación, se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la radiación solar global en la Figura 3-9. A comparación de los resultados anteriores para alcanzar un contenido de humedad de 10% db, se requiere un tiempo de secado más largo de 79.6 horas, siendo el tiempo más largo requerido de todos los casos antes mencionados.

Del mismo modo, se puede ver en la Figura 3-9 que en el rango de 2750 y 3500 minutos la radiación es baja, por lo que aumenta el contenido de humedad en el producto.

Como en los casos anteriores, para el primer día de secado sólo hay una reducción de 13 kg H<sub>2</sub>O/kg de producto seco; esto relacionado con la poca cantidad de recurso solar en dicho día que presenta un pico de tan solo 458 W/m<sup>2</sup>.

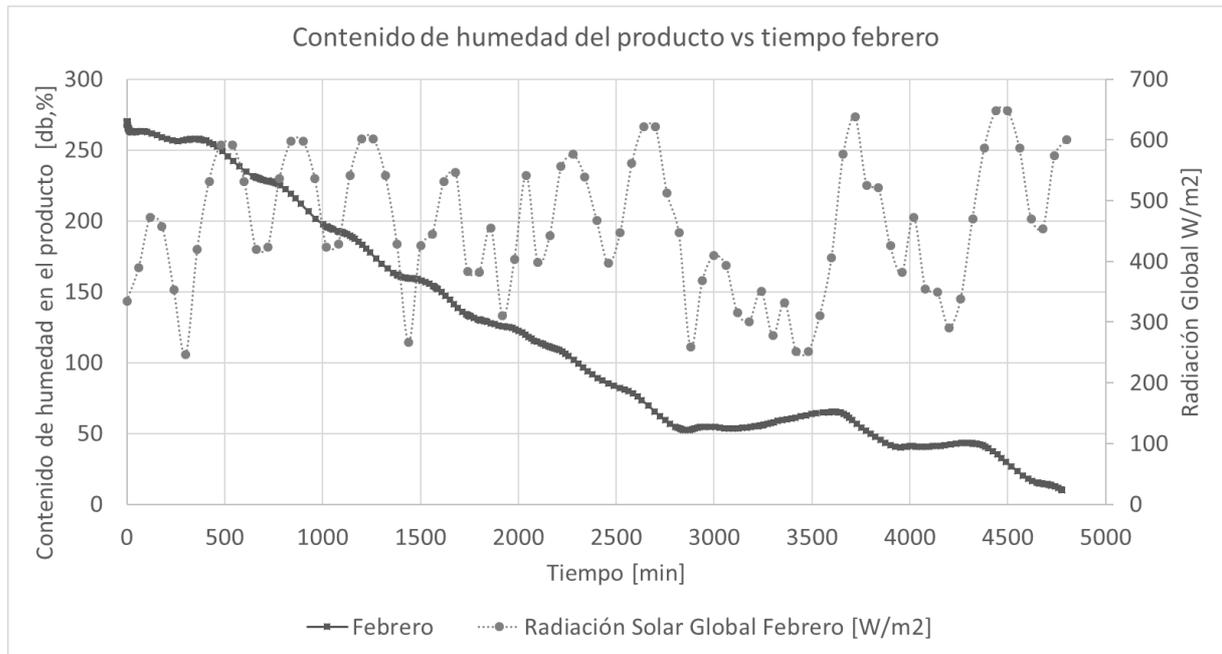


Figura 3-9: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global vs tiempo para febrero

Asimismo, se representa gráficamente la evolución temporal del contenido de humedad en el producto en base seca y la radiación solar global en la Figura 3-10 para el mes de junio. En este mes se han utilizado 10 horas por día, a partir del día 15 de junio, siendo la radiación como se observa en la Figura 3-10 solo un poco más alta que en el mes de abril en Sevilla, por lo que el tiempo requerido se reduce a 26.18 horas.

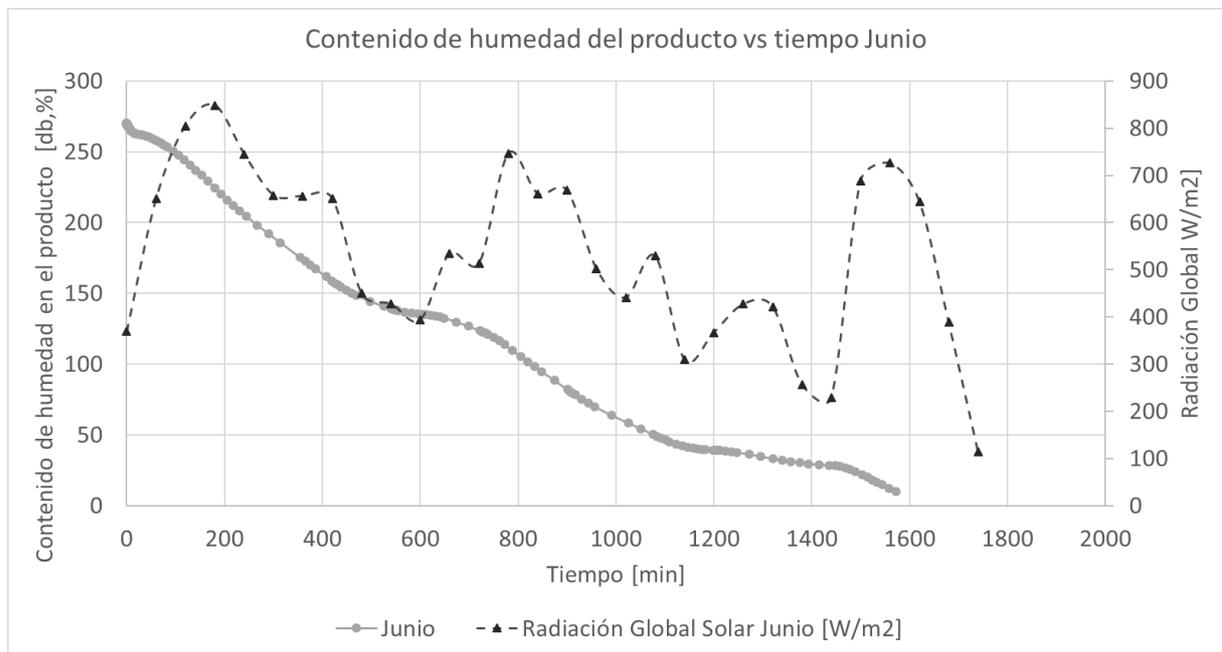


Figura 3-10: Contenido de humedad del producto e irradiación solar global vs tiempo para junio

## 4 CONCLUSIONES

---

*“A man’s friendships are one of the best measures of his worth.”*

*- Charles Darwin -*

Se ha desarrollado un modelo térmico que permite, en primer lugar, entender de mejor manera el proceso de secado, así como la identificación de los parámetros que influyen en el desempeño de un secador. Por otra parte, permite la optimización de los parámetros de diseño para la selección de materiales, predecir el comportamiento del secado y con esto lograr minimizar el tiempo requerido para el secado del ají comparándolo con el costo beneficio de estos mismos es una de las grandes ventajas de emplear el modelado térmico en combinación al numérico y el de capa fina. El paso a paso para el desarrollo del modelado computacional en MATLAB permite variar la forma del secador a uno nuevo, como lo es el tipo domo; así como estudio de otros productos, cambiando las curvas de secado y en diferentes lugares empleando los valores de las condiciones climáticas del lugar.

Se concluye que los parámetros analizados con el modelado de un secador de domo influyen en el tiempo de secado requerido para obtener un contenido de humedad del 10% db. de producto.

En el caso base, se concluye que cada componente del secado presentará su propia curva de temperatura, estando el aire al interior del domo por encima del resto con los parámetros seleccionados para el caso base. Además, el aire al interior del secador tipo domo presenta un delta de temperatura de 21°C en promedio comparado con el aire ambiente. El producto puede alcanzar temperaturas mayores a medida que el agua en su interior se va evaporando. La pendiente de la curva del contenido de humedad del producto presenta una mayor inclinación a mayor radiación solar. Así mismo existe una inercia térmica propia de cada componente del sistema. Para 20 kg de producto de ají seco han sido empleados 28.7 horas.

En el caso de la variación de la velocidad de secado, las velocidades bajas, como 0.2 m / s, pueden representar un 52% más del tiempo requerido, mientras que para velocidades superiores a 0.8 m / s, la variación del tiempo es inferior al 11%, alcanzando un óptimo con una velocidad de 1 m / s; con lo cual se concluye que existe un óptimo de velocidad para lograr la reducción de tiempo, que no necesariamente es la mayor.

En cuanto a la influencia de la cantidad de producto colocado en el interior del domo se concluye que al aumentar o disminuir en 10 kg la masa secado del producto; el tiempo empleado en el proceso varía casi en la misma proporción. La variación de 10 kg de masa seca menos dentro del domo representa un 21% menos que el tiempo requerido, mientras que 10 kg más de masa seca representa un aumento de 28.5% más.

En el caso de la variación del parámetro de velocidad de aire de secado existe una humedad relativa máxima y una temperatura mínima que se alcanza a medida que esta aumenta. Este resultado puede ser crítico al tratar de emplear la velocidad de secado como un parámetro para el control del funcionamiento del secador, es recomendable usar curvas de secado con otros productos con rangos de temperatura mayores para verificar si esto se repite para velocidades de secado aún mayores.

Una transmisividad de cubierta inferior de 0.2 afecta significativamente el tiempo requerido al demandar un 95% más de tiempo, sin embargo, aumentar dicha transmisividad a 0.4 reduce el tiempo tan sólo en un 25%. Esto permite comprender que la variación de la transividad no es proporcional a la del tiempo de secado requerido; así como, la presencia de otros factores como polvo o sombra generan un aumento significativo del tiempo de secado.

Para el caso, del modelo que utiliza otros meses del año, como febrero y junio, este se ve afectado principalmente por la variación de la radiación, siendo el mes de febrero un mes crítico, alcanzando un aumento del 177% del tiempo requerido; mientras que para el mes de junio se tiene una reducción de tiempo de 9%.

Finalmente, es necesario que el modelado pueda ser empleado en comparación con pruebas experimentales para lograr evaluar la precisión del mismo.

# REFERENCIAS

---

- [1] IRENA, «Untapped potential for climate action: Renewable energy in Nationally Determined Contributions,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [2] IRENA, «REthinking Energy 2017: : Accelerating the global energy transformation,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [3] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, «Fuentes de Energía Renovables y Mitigación del cambio climático,» Michael Melford/National Geographic Stock, 2011.
- [4] IRENA, «Global Renewable Generation Continues its Strong Growth, New IRENA Capacity Data Shows,» Abu Dhabi, 2018.
- [5] World Bank Group, «globalsolaratlas.info,» World Bank Group, 2019. [En línea].
- [6] Theglassblog, «Theglassblog,» 06 Febrero 2011. [En línea]. Available: <https://theglassblog.wordpress.com/2011/02/06/solar-and-heat-control-glasses/>.
- [7] Y. A. Cengel, Transferencia de calor y masa, México: McGraw-Hill, 2007.
- [8] J. A. Duffie y W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [9] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera y D. P. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfer, Danvers: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Academic Press, 2009.
- [11] NREL, «High Performance Flat Plate Solar Thermal Collector Evaluation,» San Francisco, 2016.
- [12] O. Taylan y H. Berberoglu, «Fuel Production Using Concentrated Solar Energy,» de *Application of Solar Energy*, InTech, 2013.
- [13] Weiss, Werner; Buchinger, Josef, Solar Drying, Gleisdorf: AEE INTEC Institute for sustainable Technologies.
- [14] O. V. Ekechukwu y B. Norton, «Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology,» vol. 40, n° 6, 1999.
- [15] H. Du, N. LI, M. A. Brown, Y. Peng y Y. Shuai, «A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field,» *Renewable Energy*, n° 66, pp. 696-706, 2014.
- [16] J. Goody y J. Rankine Goody, *Cooking, Cuisine and Class: A Study in Comparative Sociology*,

Cambridge University Press, 1982.

- [17] CBI Ministry of Foreign Affairs, «CBI,» 17 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.cbi.eu/market-information/processed-fruit-vegetables-edible-nuts/dried-tropical-fruit/>. [Último acceso: 08 Noviembre 2019].
- [18] CBI Ministry of Foreign Affairs, «CBI,» 30 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.cbi.eu/market-information/spices-herbs/dried-chillies/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2019].
- [19] A. G. M. B. Mustayen, S. Mekhilef y R. Saidur, «Performance study of different solar dryers: A review,» *ELSEVIER*, n° 34, pp. 463-470, 2014.
- [20] O. Prakash, V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar y A. Kumar, «Review on various modelling techniques for the solar dryers,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 62, pp. 396-417, 2016.
- [21] R. O. Lamidi, L. Jiang, P. B. Pathare, Y. D. Wang y A. P. Roskilly, «Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review,» *Applied Energy*, n° 233-234, pp. 367-385, 2019.
- [22] P. Singh, V. Shrivastava y A. Kumar, «Recent developments in greenhouse solar drying: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 82, pp. 3250-3262, 2018.
- [23] P. S. Chauhan, A. Kumar y B. Gupta, «A review on thermal models for greenhouse dryers,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 75, pp. 548-558, 2017.
- [24] S. Janjai, N. Lambert, P. Intawee, B. Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle y J. Muller, «Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana,» *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1550-1565, 2009.
- [25] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus y V. Khamvongsa, «A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic,» *Renewable Energy*, n° 36, pp. 1053-1062, 2011.
- [26] T. Koyuncu, «An Investigation on the performance Improvement of greenhouse-type agricultural dryers,» *Renewable Energy*, n° 31, pp. 1055-1071, 2006.
- [27] O. Prakash y A. Kumar, «Thermal performance evaluation of modified active greenhouse dryer,» *Journal of Building Physics*, vol. 37, n° 4, pp. 395-402, 2014.
- [28] S. Laxmipriya, G. Ragavi y M. Sakthisree, «The Concepts behind the Design of Geodesic Domes- An Overview,» *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, vol. 3, n° 3, pp. 583-586, 2017.
- [29] Y. D. Goswami, S. A. Lavania y M. Masood, «Analysis of a geodesic dome solar fruit dryer,» *Drying Technology*, vol. 9, n° 3, pp. 677-691, 1991.
- [30] M. A. Hossain, J. L. Woods y B. K. Bala, «Single-layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli,» *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 1367-1375, 2007.
- [31] J. F. Coronel, «Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de calor,» Sevilla, Universidad de Sevilla.
- [32] Goodfellow, «Goodfellow All the materials you need for Scientific and Industrial Research and

- Manufacturing.» Goodfellow, 2019. [En línea]. Available: <http://www.goodfellow.com/E/Polyethylene-Low-Density.html>.
- [33] M. A. Hossain y B. K. Bala, «Geometric dimensions, density, and specific heat of chilli as a function of moisture content,» *International Journal of Food Properties*, vol. 2, n° 2, pp. 175-183, 1999.
- [34] T. L. Vossler, «Comparison of Steady State Evaporation Models for Toxic Chemical Spills: Development of a New Evaporation Model,» *Defense Technical Information Center*, 1989.
- [35] J. J. Guerra, S. Álvarez, J. L. Molina y R. Velázquez, *Guía básica para el Acondicionamiento Climático de Espacios Abiertos*, Sevilla: Ciemat, 1994.
- [36] M. Condorí y L. Saravia, «The performance of forced convection greenhouse driers,» *Renewable Energy, Elsevier Science*, pp. 453-469, 1998.