



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S.C.
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA**

Título:

**DISEÑO Y SIMULACIÓN TERMODINÁMICO DE UN HORNO CON
FUENTE DE ENERGÍA HÍBRIDA SOLAR-GAS PARA LA
PRODUCCIÓN DE CHILE CHIPOTLE**

Tesis que como requisito para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

SEURI SAIGURAN KILAKOI

DIRECTOR DE TESIS:
DR. RICARDO BELTRÁN CHACÓN

CO DIRECTORA DE TESIS:
DRA. GABRIELA TAPIA PADILLA

Chihuahua, Chih. Julio de 2016

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; La Segunda lugar dedicada a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y mi hermana Dory J. Kilakoi.

Seuri Saiguran Kilakoi.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar en estas líneas mis agradecimientos a las personas, del centro de Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (*Cimav*) y Secretaría de relaciones exteriores (*S.R.E*), por el apoyo de darme la beca como estudiante extranjero en todo el tiempo de mi estudio. En primer lugar, mi más profundo agradecimiento mis directores de la tesis, al Dr. Ricardo Beltrán Chacón, y la Dra. Gabriela Tapia Padilla por su inestimable labor de dirección de tesis y, sobre todo, por la confianza depositada y por su continua atención, dedicación y apoyo, tanto a nivel profesional como personal. Asimismo, le agradezco a ellos con las ideas de partida y sus acertadas sugerencias y observaciones.

A los Investigadores del Centro *Cimav* y todos los trabajadores, por servirme de referencia, sus siempre valiosos consejos y su constante apoyo. Por todo, gracias. A la gestión de *Cimav* para darme admisión de estudiar la maestría en un centro como *Cimav*, por posibilitarme la realización de esta tesis y por confiar en el Proyecto ***Diseño y simulación termodinámico de un horno con fuente de energía híbrida solar-gas para la producción de chile chipotle.***

dentro del cual se han desarrollado muchas de las tareas de este trabajo. A Ingeniero Camarillo, por ayudarme en tantos momentos críticos en el secadero y hacerme afrontar los problemas en él con más optimismo. Y los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron, A todas las personas que, directa o indirectamente, me han ayudado en distintas etapas de la realización del trabajo, entre ellas, mis compañeros Carlos Guadalupe Hernández Dias, Abraham Dagda Torres, Pao Cárdenas Terrazas y Zoé Betty y todos los alumnos del centro *Cimav*. Con todo mi afecto, a mis papas, hermanos y hermana Dory J. Kilakoi, por todos lo que me transmite y hacerme sonreír hasta en los peores días.

CONTENIDO

<i>Dedicatoria</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Agradecimientos</i>	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vii
<i>Nomenclatura</i>	viii
RESUMEN	1
CAPITULO I	2
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 <i>Planteamiento del Problema</i>	3
1.2 <i>Antecedentes y Justificación</i>	4
1.3 <i>Objetivo general</i>	6
1.3.1 <i>Objetivos específicos</i>	7
1.4 <i>Hipótesis</i>	7
CAPITULO II	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 <i>Definición de secado</i>	8
2.2 <i>Secado de alimentos</i>	9
2.3 <i>Proceso de secado</i>	10
2.4 <i>Descripción del proceso de Secado Solar</i>	12
2.4.1 <i>Pruebas de Secado y las Curvas de Secado</i>	12
2.4.2 <i>Temperatura de secado</i>	12
2.4.3 <i>El contacto entre el gas y el producto</i>	13
2.5 <i>Las operaciones de secado</i>	13
2.6 <i>Tecnología del secado</i>	13
2.7 <i>Criterios para escoger el método de secado</i>	14
2.8 <i>Equipos para Secado</i>	15
2.8.1 <i>Secador pasivo</i>	16
2.8.2 <i>Secado en Gabinete</i>	16
2.8.3 <i>Secador Rotatorio</i>	16
2.8.4 <i>Secado en lecho estático y Fluidizado</i>	17

2.8.5 Secador de lecho fluidizado.....	18
2.8.6 Secador de bandejas.....	18
2.8.7 Secadores solares.....	20
2.9 Descripción del sistema en estudio.....	20
2.9.1 Sistema de captación de energía Solar.....	21
2.9.1.1 Colectores Solares.....	21
2.9.1.2 Colector solar de placa plana.....	22
2.9.1.3 Tanque de almacenamiento.....	23
2.9.1.4 Bomba.....	23
2.9.1.5 Control.....	24
2.9.1.6 Control (válvulas).....	24
2.9.2 Ahumador.....	24
2.9.3 Intercambiador de Calor.....	25
2.9.4 Localización Geográfica.....	26
CAPITULO III.....	27
3. METODOLOGÍA.....	27
3.1 Definición Física del Proyecto.....	27
3.2 Determinación de la Geometría del Secador.....	29
3.3 Simulación Numérica.....	29
3.4 Análisis de la variación paramétrica.....	32
3.5 Secador.....	32
3.6 Ciclo del aire.....	33
CAPITULO IV.....	34
4. MODELO MATEMÁTICO.....	34
4.1 Evaporación del agua.....	34
4.2 Presión de saturación.....	35
4.3 Humedad Relativa.....	35
4.4 Humedad específica.....	36
4.5 Densidad del Aire húmedo [Kg aire húmedo/m ³].....	36
4.6 Corriente de aire fresco.....	40
4.7 Mezcla adiabática del aire.....	40

4.8 Calentador de Aire.....	41
4.9 Proceso de ahumado.....	42
4.10 Proceso de secado.....	42
4.11 Equilibrio durante el proceso secado.....	49
4.12 Condiciones de simulación.....	50
CAPITULO V.....	53
5 RESULTADOS.....	53
5.1 Dimensionamiento del horno.....	62
5.2 Simulación TRNSYS y datos climáticos.....	72
5.3 Discusión.....	84
CAPITULO VI.....	86
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
CAPITULO VII.....	88
7. REFERENCIAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	9
FIGURA 2: DIAGRAMA CUALITATIVO DEL PROCESO DE SECADO.....	11
FIGURA 3: DIAGRAMA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES INVOLUCRADOS EN EL SISTEMA DE HORNO.....	21
FIGURA 4: COLECTORES SOLAR DE PLACA PALANA.....	23
FIGURA 5: UN TERMO TANQUE Y SU CONEXIÓN BÁSICA.....	23
FIGURA 6: UNA BOMBA ELÉCTRICA PARA EMPUJAR EL AGUA.....	24
FIGURA 7: AHUMADO.....	25
FIGURA 8: (A) ESQUEMA (A) ES UNA RECUPERACIÓN DE CALOR Y (B) ES UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	26
FIGURA 9: EL DIAGRAMA PATENTE DE FLUJO DEL AIRE Y CALOR EN EL SISTEMA.....	28
FIGURA 10: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN COLECTOR DE PLACA PLANA.....	31
FIGURA 11: TRNSYS 16.....	31
FIGURA 12: ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.....	35

FIGURA 13:EVAPORATIVO DE AGUA	35
FIGURA 14:DIAGRAMA DE BLOQUES PARA ILUSTRAR LOS PROCESOS DEL SISTEMA DE ESTUDIO	38
FIGURA 15:EL DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA (ALGORITMO).....	39
FIGURA 16:VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	59
FIGURA 17:GRÁFICO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA (KG AGUA/KG DE SOLIDO SECO) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (HORAS)	60
FIGURA 18: GRÁFICO DE PESO (KG) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (HORAS)	61
FIGURA 19:GRÁFICO DE HUMEDAD RELATIVA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	61
FIGURA 20:GRÁFICO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	62
FIGURA 21: GRÁFICO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	63
FIGURA 22: GRAFICO DEL %PESO VS TIEMPO.....	64
FIGURA 23:GRAFICO DEL VELOCIDAD DE SECADO (KG DE AGUA/H) VS TIEMPO	64
FIGURA 24:GRÁFICO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA (KG AGUA/KG DE SOLIDO SECO) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (HORAS)	65
FIGURA 25:HUMEDAD RELATIVA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	65
FIGURA 26:HUMEDAD DE LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	66
FIGURA 27:ÍNDICE DE SATURACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	66
FIGURA 28:CANTIDAD DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	67
FIGURA 29:PORCIENTO DE ERROR EN PESO (KG) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	67
FIGURA 30:VELOCIDAD DE SECADO (KG-AGUA/H) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	68
FIGURA 31:% DEL PESO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	69
FIGURA 32.POR CIENTO DEL ERROR EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	69
FIGURA 33:TEMPERATURA (°C) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	70
FIGURA 34:HUMEDAD RELATIVA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	71
FIGURA 35:CANTIDAD DE ENERGÍA (kJ/s) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (H).....	71
FIGURA 36:ETAPA EN EL DISEÑO DEL SIMULADOR DE SECADO PARA CHILE CHIPOTLE	72
FIGURA 37:PROMEDIO DE ENERGÍA SOLAR POR CADA MES DEL AÑO	75
FIGURA 38.EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE ENERGÍA SOLAR	75
FIGURA 39:LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA AMBIENTE Y BULBO HÚMEDO DE UN AÑO TÍPICO.....	76
FIGURA 40:.HUMEDAD ABSOLUTA EN UN AÑO TÍPICO DE CHIHUAHUA	77

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: NOMENCLATURA DEL HORNO PARA MODO DE CIRCULACIÓN NORMAL.....	28
TABLA 2: BALANCE DE MASA EN PARTE DE MEZCLA ADIABÁTICA DE AIRE	41
TABLA 3: BALANCE DE MASA EN PARTE CALENTAMIENTO DE AIRE.....	41
TABLA 4: BALANCE DE ENERGÍA ETAPA A-B.	43
TABLA 5: BALANCE DE ENERGÍA Y MASA EN LA ETAPA DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE	46
TABLA 6: BALANCE DE ENERGÍA Y MASA EN LA PRIMERA ETAPA DE VELOCIDAD DE SECADO DECRECIENTE	49
TABLA 7: RECIRCULACIÓN Y SALIDA DE AIRE	50
TABLA 8: DESCRIPCIÓN DE ‘TYPES’ USADOS EN EL SIMULADOR.....	72
TABLA 9: ENERGÍA PROMEDIO QUE EL SISTEMA ESTÁ APROVECHANDO CON SOLAR Y GAS	74

Nomenclatura

X_C	Contenido de humedad crítico [kg H ₂ O / kg solido seco]
X_e	Contenido de humedad de equilibrio [kg H ₂ O / kg solido seco]
X_i	Contenido de humedad inicial [kg H ₂ O / kg solido seco]
X_t	Contenido de humedad en base seca [kg H ₂ O/kg sólido seco]
X	Contenido de humedad libre [kg H ₂ O / kg solido seco]
%h	Porcentaje de humedad [kg H ₂ O / kg solido húmedo]*100
h_c	Coefficiente de transferencia de calor convectivo [W/m ² K]
T_c	Temperatura del gas seco (Temperatura de bulbo seco) [K]
T_P	Temperatura interracial (Temperatura de bulbo húmedo) [K]
T_4	Temperatura deseada para el suministro de aire al horno [K]
T_3	Temperatura de la mezcla adiabática del aire fresco y recirculación [K]
T_a	Temperatura de bulbo seco promedio del aire [°C]
T_s	Temperatura de la superficie del chile chipotle [al final de esta etapa será igual a T_w]
T_w	Temperatura de bulbo húmedo [K]
T_s	Temperatura de bulbo húmedo promedio del aire [°C]
T_1	Temperatura ambiente [°C]
T_i	Temperatura inicial del chile chipotle [°C]
T_s	Temperatura de la superficie del chile chipotle [°C]
A	Área de la zona de secado [m ²]
%Xt	Porcentaje del peso del sólido seco
Φ	Humedad relativa
Y	Humedad específica

w_2	<i>Humedad salida de la cámara con menor temperatura</i>
$\Delta\omega$	<i>Diferencia de humedad absoluta</i>
v_h	<i>Volumen específico del Aire Húmedo [m^3/kg aire seco]</i>
h_{fg}	<i>Calor latente de vaporización [J/kg] Temperatura en [K]</i>
\dot{m}	<i>Flujo másico de aire</i>
P_{sat}	<i>Presión de saturación del agua [kPa]</i>
P_v	<i>Presión de vapor [kPa]</i>
P	<i>Presión del trabajo (atmosfera) [kPa]</i>
V_1	<i>Velocidad del aire fresco [m/s]</i>
ρ_a	<i>Densidad del aire fresco [kg aire/m^3]</i>
A_a	<i>Área de entrada del aire fresco [m^2]</i>
$\frac{\partial M}{\partial t}$	<i>Velocidad de transferencia de masa (velocidad de secado) [$kg s^{-1}$]</i>
k_y	<i>Coefficiente de transferencia de masa [$kg m^{-2} s^{-1}$]</i>
A	<i>Área de la superficie disponible para el secado [m^2]</i>
A_T	<i>Área total del chile [m^2]</i>
Y_s	<i>Contenido de humedad en el aire a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido T_s (humedad en la superficie)</i>
Y_a	<i>Contenido de humedad del aire</i>
R	<i>velocidad de secado [$kg/m^2 s$]</i>
m_{ah}	<i>Flujo másico del aire húmedo en punto [kg/s]</i>
ρ	<i>Densidad del aire húmedo [kg aire húmedo/m^3]</i>
F_{ah}	<i>Tasa de flujo volumétrico [m^3/s]</i>
I	<i>Índice saturación</i>

m	<i>Masa [kg]</i>
m_a	<i>Flujo másico del aire seco [kg/s]</i>
m_v	<i>Flujo másico del vapor en el aire [kg/s]</i>
M_T	<i>Masa total del chile húmedo [kg]</i>
M_w	<i>Masa de agua en el chile [kg]</i>
\mathcal{E}_m	<i>Espesor del chile [m]</i>
A_m	<i>Área ocupada por el chile [m²]</i>
A	<i>Aire [m²]</i>
v	<i>Vapor de agua</i>
ah	<i>Aire húmedo</i>
$\frac{\partial Q}{\partial t}$	<i>Velocidad de transferencia de calor [W]</i>
h	<i>Es el coeficiente de transferencia de calor por convección [W m⁻² K⁻¹]</i>
λ	<i>Calor latente de vaporización [kJ/kg]</i>
V_c	<i>Volumen de Control</i>

RESUMEN

El jalapeño es un fruto alargado de aproximadamente 7,5 cm y su diámetro de 2,5cm, el color lo define el grado de maduración que tenga, a partir de verde, luego amarillo, y hasta llegar a rojo que es la maduración total. El chile chipotle es obtenido sometiendo al chile jalapeño a un proceso de ahumado y de reducción de humedad. Una preocupación en relación a la producción del chile chipotle es el uso de leña como fuente de energía del sistema de secado. En el presente trabajo se atiende la posibilidad de reducir la humedad del producto, a través de un sistema híbrido asistido con energía solar y gas LP. El diseño propuesto es un secador industrial que utiliza el método de secado por convección forzada, con la intención de reducir en 48 horas la humedad de 4375 kg de chile fresco hasta un 10%. Para que el aire sea capaz de remover la mayor cantidad posible de humedad del producto, el insumo principal del proceso es aire caliente (77 ± 2 °C), con una humedad relativa baja. La humedad relativa del aire es dependiente de la humedad absoluta que tenga el aire y de la temperatura, por lo que tenemos una variable inconsistente durante todo el año. El proceso inicia cuando el aire bajo condiciones ambientales es impulsado por un abanico, hacia el interior de un intercambiador de calor de flujo cruzado (agua –aire). En su paso por el intercambiador de calor, el aire recibe energía térmica transmitida por el agua que ha sido previamente calentada mediante el uso de energía solar. Si para alcanzar la temperatura de 77 ± 2 °C del aire se requiere una mayor energía que la aportada por una velocidad másica de agua de $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ a una temperatura superior a los 90 °C, entonces se utilizará una caldera que utilizará gas como combustible. La determinación de los balances de masa y energía del sistema proporcionan una estimación del porcentaje de aporte energético de cada una de las fuentes, solar y gas LP. Para el establecimiento de los balances de masa y energía, se desarrolló un modelo matemático, utilizando como herramienta de simulación los softwares Matlab-versión 803 y TRNSYS 16. Como resultado de este trabajo, se observó que es posible disminuir el consumo de energía proveniente de fuentes que no son amigables para el medio ambiente, como es el consumo de leña como combustible. Mediante la inclusión de energía térmica solar en el sistema de operación del sistema de secado se logró estimar su aporte energético en el sistema, utilizando datos climatológicos históricos de Chihuahua. En estudios posteriores, un análisis paramétrico podría concluir si la inversión inicial en equipo para aprovechar la energía solar térmica es rentable y la determinación del ahorro económico respecto a un sistema que funcione puramente con gas.

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con cifras mundiales de comercio de la FAO, México fue el segundo lugar mundial en la producción de chile verde, con una participación en el total mundial de 7.38% en el 2009. El primer lugar lo ocupa China con un volumen de producción de 14, 524,178 millones de toneladas en el 2009. México tuvo un volumen promedio anual de producción de 1999 a 2009 de 1,801.8 miles de toneladas. Además, México ocupa el décimo segundo lugar en la producción de chile seco para 2011 [FAOSTAT, 2012]. Entre los principales clientes se encuentran Estados Unidos, Japón, Canadá, Reino Unido y Alemania [SIAP, 2010].

Caro Encalada [et al., 2014] presentan un análisis del comportamiento del mercado internacional de los chiles verdes y su influencia sobre las exportaciones y competitividad de México durante el período 1999-2009, donde se concluye que la tendencia favorable observada en la oferta y comercio mundial de chile verde, le confieren una competitividad macroeconómica alta. Asimismo, [Gaytan y Benita, 2014] presentaron algunos indicadores de competitividad en la producción de chile seco en México, y hace una descripción de la evolución su exportación. Los resultados de este estudio sugieren que México ocupa un importante lugar en la producción global pero no tiene una posición de liderazgo en las exportaciones de chile seco a nivel mundial.

En materia de comercio exterior, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, que es un órgano desconcentrado de la SAGARPA, México encabeza la lista de los 10 principales países exportadores de chile verde y ocupa el sexto lugar en la lista de exportadores de chile seco [SIAP, 2010].

Según estimaciones realizadas para el período del año 2000 al 2009, cada mexicano consume en promedio 15 kilogramos de chile al año. En el año 2009, la variedad de chile con mayor producción en México fue la de chile jalapeño, con una producción de 618, 684 toneladas, representando el 31% de la producción total nacional [SIAP, 2010]. El chile jalapeño se siembra en todo el país, con excepción de Aguascalientes. El estado con mayor porcentaje de producción de chile jalapeño es Chihuahua 42%.

Uno de los métodos más antiguos utilizados por el hombre para la conservación de los alimentos es la deshidratación (principalmente en zonas rurales). En un ambiente seco no pueden actuar ni los microorganismos ni las enzimas que arruinan estos productos [Castañeda

Miranda et al., 2012]. El chile seco tiene gran demanda, ya que tiene un sabor agradable, así como ventajas nutritivas, de transporte y de manera de empaque.

El chile chipotle es un alimento e ingrediente de gran importancia en muchos países. La palabra chipotle deriva del náhuatl “chili” que se refiere a fruto picante y “pochtl” que significa ahumado. El proceso de elaboración artesanal o tradicional de chile chipotle consiste en colocar una cama de chiles jalapeños rojos de cualquier variedad sobre una plataforma de fondo permeable, a través de la cual se hacen pasar los gases de combustión de leña, hasta lograr de manera simultánea la deshidratación y ahumado del chile. La norma mexicana [NMX-FF-108-SCFI, 2007] establece las condiciones y características de calidad que deben cumplir los chiles jalapeños rojos (*Capsicum annum*) de cualquier variedad enteros secos o deshidratados y ahumados con leña conocidos como chiles chipotle destinados para consumo humano que se procesan y comercializan en el territorio nacional. Además, se establecen los métodos generales para determinar el contenido de materia extraña y color. Esta norma no contempla otros tipos de chiles secos enteros que también se producen y comercializan a nivel regional.

En nuestros días, existen sistemas de deshidratación mecánicos en los cuales el secado se realiza por medio de combustible, es decir, el secado se lleva a cabo por efecto de los gases generados al quemar el combustible (o al calentar el aire que, a su vez, llevará a cabo el proceso de deshidratación). A lo largo del tiempo, se han desarrollado tecnologías cada vez más eficientes y eficaces para la deshidratación de alimentos [Castañeda Miranda et al., 2012]. Los hornos para el deshidratado de chiles y otros productos agrícolas, se basan en transportar calor a través de una corriente de aire, pues el aire va tomando la humedad que los eliminan o desprenden cuando éstos son sometidos a incrementos de temperatura [Rico López, 2003].

1.1 Planteamiento del Problema

Los hornos chipotleros constituyen una fuente importante de ingresos y de empleos para el estado de Chihuahua. Sin embargo, también han estado envueltos en una polémica debida al alto costo ambiental que representan, tanto en tala de bosques como en contaminación emitida. Estos factores contribuyen poderosamente al cambio climático y a la desertización.

Chihuahua por su situación geográfica, cuenta con un alto riesgo de sufrir la desertización de su territorio, por lo que la conservación de sus bosques se rebela como el método más eficaz para evitarla.

El proceso actual de producción de chile chipotle, merece especial atención en términos de impacto ambiental y social, ya que la depredación forestal de las regiones cercanas a donde se cosecha la variedad de chile jalapeño ha dejado grandes extensiones deforestadas. La sustitución de la leña del proceso artesanal actual, por energía solar gas y aserrín, reducirá significativamente la continuación de este proceso de deforestación [Olivas, 2003].

En este sentido, con la realización de este proyecto se busca reducir el consumo de madera que tienen los hornos convencionales para producir este alimento y su muy negativo impacto sobre los bosques del estado.

1.2 Antecedentes y Justificación

El tiempo de secado está influenciado por múltiples variables como el tipo de producto a secar, el clima de la región y el diseño del horno. En un horno comercial de deshidratación de chile chipotle se puede emplear aire caliente, producido ya sea por un quemador de gas LP de un calentador o por una resistencia eléctrica, y es empujado por la acción de un ventilador. El combustible para llevar a cabo el proceso en el horno puede ser en algunos casos gas o electricidad, ambas energías no renovables, cuyo costo ha ido aumentando con respecto al tiempo, además de contribuir con el deterioro ambiental.

La producción de alimentos deshidratados tiene altos costos de producción, de los cuales el más alto se encuentra en la fase de secado, dando como resultado un producto de costo elevado. Por lo anterior, conviene contar con energía renovable en el proceso de secado con el fin de producir al menor costo, así como reducir el impacto ambiental.

El propósito de este proyecto es la simulación de un sistema de calentamiento de un horno que proveerá de aire a un secador de chile jalapeño maduro bajo las condiciones climatológicas y geográficas de la ciudad de Chihuahua. La simulación se realizará mediante el uso del software MATLAB-versión 803 y TRNSYS 16 (Transient System Simulation Tool).

El diseño del sistema será analizado para que el horno sea capaz, en cualquier momento, de abastecer aire a una temperatura de 77 ± 2 °C al secador. El horno será abastecido de aire bajo las condiciones climatológicas de un año típico en Chihuahua. En función de la capacidad del secador, se hará un estudio para determinar el número de colectores solares para el suministro de energía al horno. Bajo este esquema se comparan dos sistemas de horno. El primero simula un sistema que usa gas para el calentamiento del aire y el segundo que usa tanto gas como energía solar para el mismo fin. Bajo el análisis de la variación paramétrica, se

obtendrán valores de consumo energético en el calentador a gas, así como el aporte energético de los colectores solares utilizados en el sistema. Estos valores serán analizados en base al costo del gas como costo de operación, así como el costo de los colectores solares y el tanque de almacenamiento como costo de inversión con el fin de obtener la configuración óptima para el número de colectores y capacidad del tanque de almacenamiento.

Un sistema de recuperación de calor además de recuperar una cantidad importante de energía para su aprovechamiento en el secado y consecuentemente reducir el consumo de combustible. Además, se pretende que el diseño del sistema determine el tiempo para la expulsión del aire cuando el índice de saturación sea alto. Por tal motivo este sistema tecnificado, poseerá dispositivos que controlen el humo, humedad, temperatura, así como la recirculación de éstos. Además, permitirá mantener una alta calidad de producto en términos de repetibilidad y uniformidad tanto en textura como en sabor del chile chipotle y, en su caso, de los vegetales y frutas deshidratados. Con este proyecto, esperamos obtener un horno que pueda cumplir con las necesidades de suministro de aire a un secador que, al ser alimentado con 4375 kg de chile fresco, produzca 625kg de chile chipotle cada 48hr.

La iniciativa de un horno más ecológico surgió años atrás, tras la solicitud de la Asociación de Chipotleros de Camargo, quienes acudieron al CIMAV para exponer su idea de fomentar su actividad industrial empleando para ello tecnologías más respetuosas con el medio ambiente. Tras esta petición comenzaron los trabajos que dieron como resultado un prototipo de horno para la producción de chile chipotle con un procedimiento moderno. Este horno es capaz de sustituir el proceso tradicional que quema grandes cantidades de madera por uno más respetuoso con el medio ambiente. Con este horno es posible reducir el consumo de leña en forma drástica, pasando de 2.5 toneladas de madera por tonelada de chile chipotle producido a tan solo 54 kg para la misma cantidad (para el proceso de ahumado) [VARGAS, 2003].

Un desarrollo realizado en colaboración con la Universidad Autónoma de Chihuahua que llevó a cabo un estudio detallado sobre la mejora del procedimiento de deshidratado y ahumado del chile para su venta incluso en el extranjero [Andión et al, 2012].

También el diseño supone una ventaja para la salud de los operarios que trabajan en ellos. En la producción de forma tradicional, el secado y ahumado se efectúa a cielo abierto por lo que los trabajadores están expuestos a grandes cantidades de humo y otros contaminantes. Por el contrario, en el nuevo horno híbrido solar los operarios, además de emplearse mucho menos

combustible y una fuente de energía renovable inocua, trabajan desde un panel de control alejados de los humos de la combustión. Adicionalmente la unidad está cerrada y aislada térmicamente para permitir un aprovechamiento óptimo del calor generado, lo que expone aún menos a los trabajadores. De esta forma se reduce al máximo el costo económico y ambiental del procesado añadiéndole un valor agregado al producto. Este sistema altamente tecnificado cuenta además con elementos que permiten un control de parámetros como humedad, calor, humo o la recirculación de los productos, ofreciendo además la posibilidad de deshidratar otro tipo de productos como frutas y verduras [VARGAS, 2003].

Con el desarrollo del presente proyecto se pretende pasar del diseño del prototipo de horno al diseño de un horno de mayor capacidad, que además incluye:

- Un Sistema de recuperación de calor.
- Un sistema de aportación de energía solar mediante agua caliente solar con termo tanque.
- Un conjunto de estrategias de operación óptimas para alta producción o bien alta eficiencia.

El diseño del horno híbrido de alta eficiencia para producción de chile chipotle podrá sustituir el proceso artesanal actualmente utilizado por los productores. Esto permitirá ofrecer

- Producir alta calidad.
- Controlando varios aspectos como, mínima contaminación, capacidad de empacar el producto listo para ser consumido al momento de salir del horno.
- Disminuir los costos.
- Reducir emisiones.
- Sustentabilidad del proceso.
- Inocuidad sanitaria y predicción de las cantidades diarias de producción.
- Facilidad de limpieza del horno, agilizando el cumplimiento de normas sanitarias.

1.3 Objetivo general

Simular y diseñar termodinámicamente un horno para producción de chile chipotle con fuente de energía híbrida solar-gas para una capacidad de 625kg de chile chipotle cada 48hr, considerando un sistema de recuperación de calor y aporte solar para precalentamiento del aire.

1.3.1 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo matemático para describir los diferentes procesos involucrados en el sistema de producción de chile chipotle, considerando un secador de bandejas con aporte de energía solar para el precalentamiento del aire y un sistema de recuperación de calor por recirculación del aire.
- Validar el modelo a través de la comparación de los resultados obtenidos por el modelo y los resultados experimentales de horno prototipo.

1.4 Hipótesis

Es factible diseñar y optimizar un sistema de horno asistido con fuente de energía solar y evaluar su viabilidad técnica, utilizando simulación dinámica.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe el proceso de secado, así como las principales tecnologías de secado para diferentes presentaciones de alimentos. Asimismo, se describen las operaciones de secado en las cuales se basa el presente estudio.

2.1 Definición de secado

El secado usualmente se define como el proceso de remoción térmica de sustancias volátiles (humedad) hasta obtener un producto seco [Mujumdar, 2006]. Es una operación unitaria en la que se da el transporte simultáneo de calor y masa [Fito et al., 2001]. La transferencia de energía (principalmente como energía térmica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior [Mujumdar, 2006].

La remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido depende de condiciones externas de temperatura, flujo y humedad del aire, área de la superficie del material expuesta y presión mientras que el movimiento del agua a través del sólido depende de su composición física, la temperatura y su porcentaje de humedad [Mujumdar, 2006].

La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos [Mujumdar, 2006]. A continuación, se explica brevemente cada mecanismo:

Convección: El calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente (u otro fluido) que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido (Figura 1 a) [Fito et al., 2001].

Conducción: El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor.

El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua (Figura 1 b) [Fito et al., 2001].

Radiación: Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas

de agua, por ende, mientras el producto se seca, se requiere menos energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m –0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el (Figura 1 C) [Mujumdar, 2006].

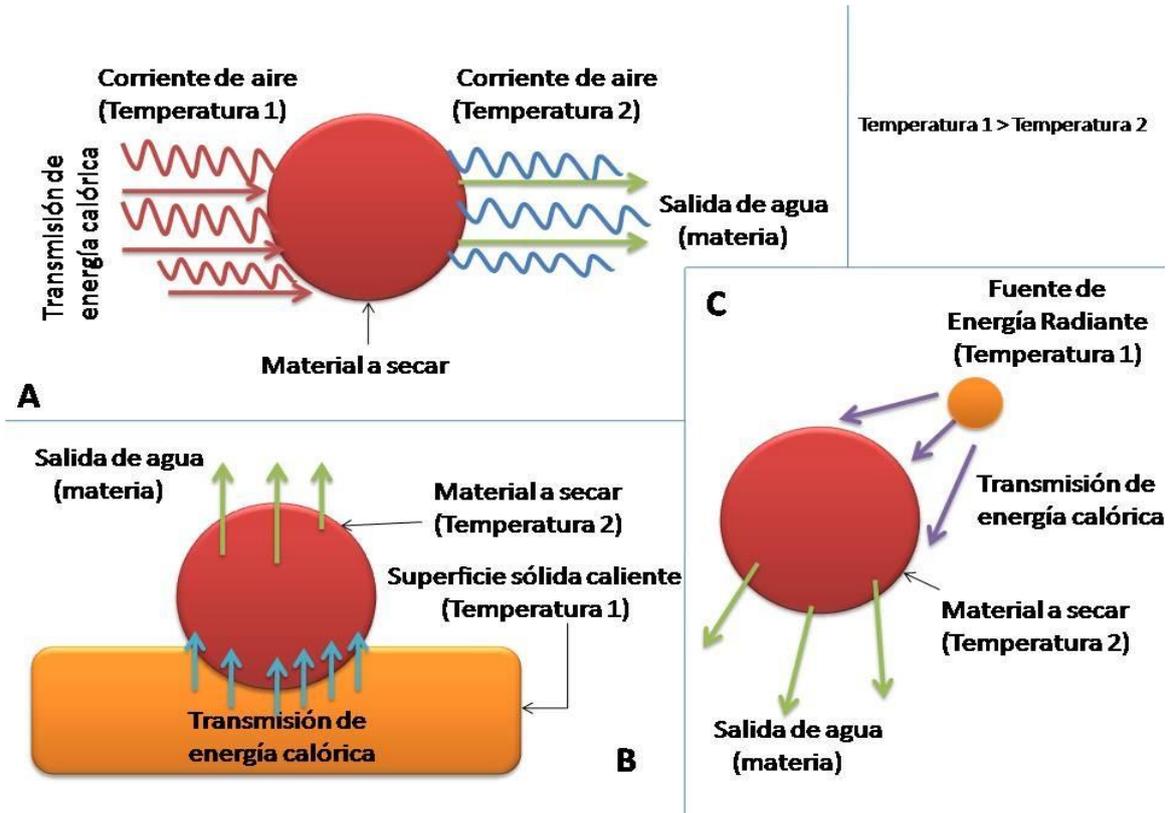


Figura 1: Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor.

A. Convección; B. Conducción; C. Radiación.

2.2 Secado de alimentos

El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, ras y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia [Fito et al., 2001]. Es uno de los procesos más rentables para conservar productos alimenticios, el cual se basa en la remoción de agua mediante la aplicación de calor [Jangam et al., 2010]. La operación de secado además conlleva una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transportes y almacenamiento de estos productos [Fito et al., 2001].

La operación de secado involucra una serie de cambios físicos, químicos y sensoriales en el alimento que dependen de la composición de éste, así como de la severidad del método de secado. Ejemplos de estos cambios son encogimiento, cristalización, despolimerización, variación de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento.

Estos factores relacionados con la calidad del producto deben ser analizados cuando se va a diseñar una operación de deshidratación de alimentos, para así provocar un mínimo daño al alimento, sin olvidarse de aspectos más tecnológicos relacionados con la eficacia y el costo del proceso [Contreras, 2006].

En el sector alimenticio es necesario mantener la calidad del producto durante el secado además de reducir el costo del proceso. Debido a esto es necesario desarrollar técnicas de secado innovadoras y rentables en este rubro [Jangam et al., 2010].

2.3 Proceso de secado

El término secado se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. Como referencia se resumen a continuación ciertos términos que se utilizan para describir el contenido de humedad de las sustancias. Contenido de humedad de un sólido, se expresa por lo común como la cantidad de humedad por unidad de peso de sólido seco o húmedo.

En el secado de sólidos es más conveniente referir la humedad como contenido de humedad en base seca, definida como:

$$X_t = \frac{\text{Peso sólido húmedo} - \text{Peso sólido seco}}{\text{Peso sólido seco}}$$

El porcentaje de humedad, expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado. Se define como:

$$\%h = \frac{\text{Peso sólido húmedo} - \text{Peso sólido seco}}{\text{Peso sólido húmedo}} * 100$$

Contenido de humedad de equilibrio (X_e), es la humedad limitante a la cual un material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura y humedad del gas.

Contenido crítico de humedad (X_c), es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.

Contenido de humedad libre (X), es el líquido que se puede separar a una temperatura y humedad dadas. La humedad libre es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas:

$$X = X_t - X_e$$

Periodo de velocidad constante, es el lapso de secado durante el cual la velocidad de eliminación de agua por unidad de superficie deseada es constante o uniforme.

Periodo de velocidad decreciente, es un lapso de desecación durante el cual la velocidad instantánea de secado disminuye en forma continua [Geankoplis C.J, 1995].

Las operaciones de secado pueden llevarse a cabo en lotes o en continuo (Figura 2). El secado por lotes es una operación relativamente cara, en consecuencia, se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto, a trabajos de investigación y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.

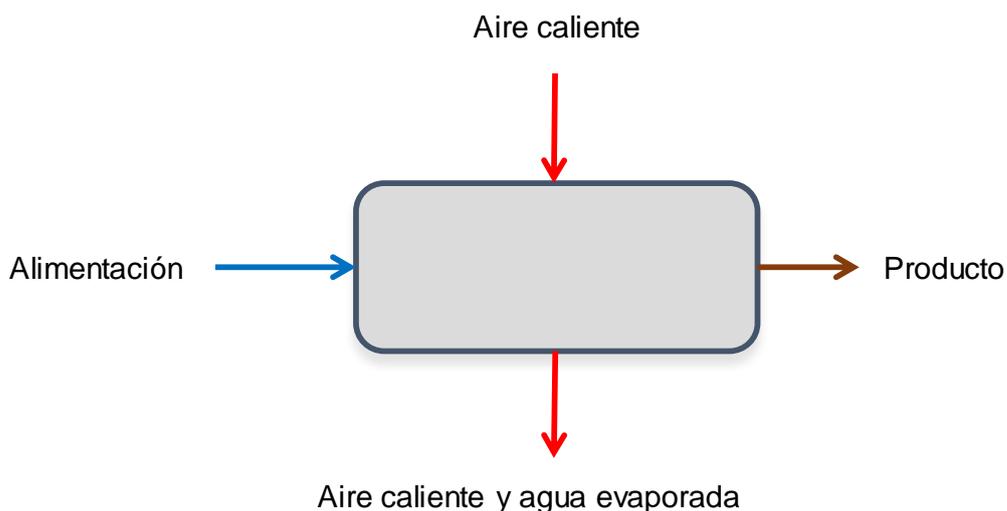


Figura 2: Diagrama cualitativo del proceso de secado

Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales, es conveniente estimar el tamaño del secador, las diferentes condiciones de operación de humedad y temperatura para el gas empleado, y el tiempo requerido para lograr el grado de secado requerido.

El contenido de humedad de equilibrio del material a secarse bajo condiciones específicas de humedad y temperatura del gas debe determinarse experimentalmente. Las mediciones de velocidad del secado por lotes son relativamente fáciles de obtener a partir de datos experimentales y proporcionan mucha información no sólo para la operación por lotes sino también para la continua.

2.4 Descripción del proceso de Secado Solar

Entendemos por “secado” la disminución de la humedad de un sólido húmedo mediante un procedimiento térmico. A veces el concepto de secado se extiende a la eliminación de agua mediante procedimientos mecánicos (prensado, filtrado, centrifugado, etc.), sin embargo, en este caso es preferible denominar al proceso como deshidratación de alimentos [Díaz & Pablo, 2010].

El secado de los alimentos es uno de los métodos más antiguos utilizados para su conservación, ya que al reducirse el contenido de agua en un alimento:

- Se reduce la posibilidad de su deterioro biológico, y se reducen otros mecanismos de deterioro.
- Se reduce su peso y volumen, aumentando la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje (sopas deshidratadas, leche en polvo, etc.).
- Puede conseguirse un alimento más apto para el consumo (jamón serrano, chorizo, pimientos para pimentón, etc.).

2.4.1 Pruebas de Secado y las Curvas de Secado

Con respecto a una muestra a secar, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, en una corriente de aire. Entonces, el peso de la muestra secada puede medirse como una función del tiempo.

Usualmente, un proceso de secado es descrito por los gráficos construidos con los siguientes ejes de coordenadas:

1. Contenido de humedad del material contra tiempo de secado (curva de secado)
2. Velocidad de secado contra contenido de humedad del material (curva de velocidad de secado)
3. Temperatura del material contra contenido de humedad (curva de temperatura)

2.4.2 Temperatura de secado

La elección de la temperatura de secado es muy delicada debido a que:

- una elevada temperatura permite aumentar la velocidad de secado, pero conduce a veces a la aparición de una costra en la superficie del producto, fenómeno que dificulta la extracción de humedad;
- una temperatura demasiado baja aumenta considerablemente el tiempo de operación;

-
- algunos productos son termosensibles y no pueden ser secados a temperaturas superiores a 60 °C, por ejemplo. Como ya se ha mencionado, la convección es el método de transferencia más utilizado en el secado [Ibarz, A. et Al, 2000].

2.4.3 El contacto entre el gas y el producto

El contacto entre el aire caliente y el producto puede realizarse mediante secado simple, donde el aire circula a lo largo de la superficie del producto que está dispuesto en capas delgadas sobre las charolas, los carros o las bandas transportadoras. Esta técnica es conveniente para el secado de productos pulverulentos, granulosos o compactos. El tiempo de residencia en el aparato puede ser fácilmente controlado.

La técnica de combinación de dispersión y raspado en los secadores de tambor está bien adaptada para sólidos granulosos. En general, el tiempo de residencia del producto en el secador es largo [Bhandari et al, 1997].

2.5 Las operaciones de secado

Las operaciones de secado pueden llevarse a cabo en lotes o en continuo. El secado por lotes es una operación relativamente cara, en consecuencia se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto, a trabajos de investigación y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado. Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales, es conveniente estimar el tamaño del secador, las diferentes condiciones de operación de humedad y temperatura para el gas empleado, y el tiempo requerido para lograr el grado de secado requerido.

El contenido de humedad de equilibrio del material a secarse bajo condiciones específicas de humedad y temperatura del gas debe determinarse experimentalmente. Las mediciones de velocidad del secado por lotes son relativamente fáciles de obtener a partir de datos experimentales y proporcionan mucha información no sólo para la operación por lotes sino también para la continua [Treybal, 1993].

2.6 Tecnología del secado

El secado es una operación unitaria ampliamente usada en la industria química, comprende la remoción de un solvente (en la mayoría de los casos agua), para producir un sólido con determinada cantidad de líquido. El sólido final puede tener forma de escamas, cristales o polvo. Los equipos que se encuentran antes y después de los secadores, las características finales del producto sobre todo cuando se trata de mejorar la eficiencia, las normas

ambientales o cumplir con determinada especificación deseada para un proceso posterior [McCabe et al, 1991].

2.7 Criterios para escoger el método de secado.

Hay que tomar en cuenta diversos criterios para escoger el método que mejor se adapte al secado de una sustancia. Los criterios a considerar para escoger la tecnología que mejor se adapte al secado de una sustancia [Land Van't, 1984] incluyen:

- el modo de funcionamiento del aparato
- la naturaleza y calidad del producto a secar
- la fuente de calor y el modo de transmisión del mismo
- la seguridad
- el consumo de energía
- la facilidad para controlar el tiempo de tratamiento

La elección del método de secado es generalmente una situación ponderada de todos estos factores.

Modo de funcionamiento del aparato. El funcionamiento puede ser discontinuo o continuo.

La elección depende de la importancia de la producción. Si ésta es pequeña, a menudo se escoge un funcionamiento discontinuo. Si, al contrario, la producción es importante, las operaciones de carga o descarga a efectuar en discontinuo se volverían más tediosas.

Naturaleza del producto a secar. La preparación, modo de manejo, fuente de calor a utilizar, modo de transmisión y concepción de los sistemas de aireación, dependen de la naturaleza del producto a secar. Puede tratarse de líquidos, pastas, materiales pulverizados, granulados, fibrosos o compactos [Land Van't, 1984].

- Los cuerpos pastosos muy viscosos frecuentemente se laminan sobre tambores y después se desmenuzan, lo cual les confiere una textura cercana a la de los sólidos. También pueden ser tratados sobre bandas o en secadores de tornillo.
- Los sólidos pulverulentos (o susceptibles a ser triturados) son secados generalmente en secadores de banda, cilindro, lecho fluido, lecho móvil, transporte neumático. Si son susceptibles a aglutinación se puede diseñar una recirculación de producto seco para reducir los riesgos de aglomeración (bajo reserva de que el aumento en el tiempo de residencia puede contribuir a una degradación de los productos).
- Los productos compactos o en trozos son tratados en secadores de gabinete, en túneles de carros o banda transportadora.

-
- Un producto bombeable ofrece más posibilidades de tratamiento que uno no bombeable. La cantidad de producto a obtener puede limitar la elección del modo de secado. Así, por ejemplo, el secado de colorantes, de productos farmacéuticos o alimenticios, debe llevarse a cabo evitando toda contaminación del producto o el someterlos a atmósferas que los puedan degradar; por ello muchos de estos productos se secan en pequeños lotes.

Fuente de calor y modo de transmisión. En los secadores de convección o conducción, pueden utilizarse los fluidos calientes clásicos (vapor, agua caliente, gas de combustión) para suplir el calor necesario para la extracción de humedad. Estos fluidos circulan generalmente por chaquetas o por tubos en contacto con el material a secar (secado por conducción) o dentro de los calentadores de aire (secado por convección). Si los gases de combustión están limpios, se les puede poner en contacto directo con el material a secar. El secado por irradiación infrarroja se efectúa por medio de lámparas eléctricas o de paneles calefactores. El secado por corrientes de alta frecuencia se utiliza sobre todo cuando la calidad del producto seco es determinante [Land Van't, 1984].

Seguridad del proceso. Conviene no perder de vista que el secado de algunos productos puede llevar a la formación de polvo en las zonas secas, esto es, a la salida del secador o de los ciclones, lo que puede provocar problemas de contaminación. Además, algunos productos que conlleven emanaciones tóxicas deben ser tratados por métodos especiales.

Consumo de energía. La eficiencia energética de los secadores térmicos es baja. En efecto, debemos recordar que el objetivo del secado es de arrastrar y eliminar un líquido de un producto al cual está inicialmente ligado por uniones de tipo químico (iónicas, covalentes, metálicas) o de tipo electrostático (enlaces de Van der Waals, puentes de hidrógeno), uniones que requieren un gran consumo de energía para ser rotas. El rendimiento de los secadores pocas veces sobrepasa el 60%. Es importante entonces, incluir técnicas susceptibles a economizar energía [McCabe et al, 1991].

El tiempo de residencia de los productos es variable. El secado por conducción se emplea sobre todo para el tratamiento de líquidos, productos pastosos o sólidos que no pueden ser puestos en contacto con el aire [Longman, 1991].

2.8 Equipos para Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor

aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente según que sean por lotes o continuas. Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia que está secando. El equipo de secado, puede ser tan sencillo como un soplador con una resistencia adaptada, o tan complejo como un secador rotatorio.

2.8.1 Secador pasivo

Los secadores pasivos utilizan sólo el movimiento natural del aire caliente. Pueden ser contruidos fácilmente con materiales baratos y disponibles localmente que los hacen cuando las pequeñas explotaciones, donde el material de construcción en bruto, tales como la madera es fácilmente disponible. Un secador pasivo es uno en el que la comida es directamente expuesta a los rayos del sol.

Los secadores pasivos son los mejores para el secado de pequeñas cantidades de frutas y verduras como el plátano, piña, mango, papa, zanahorias, entre otros [Jayaraman KS, 2000].

Los secadores solares activos son conocidos por ser adecuados para el secado de productos alimenticios con mayor contenido de humedad tales como la papaya, kiwi, berenjena, col y coliflor rebanadas.

2.8.2 Secado en Gabinete

Puede considerarse como un secado de túnel, en donde la longitud es reducida y se trabaja en forma discontinua. El recinto de secado es generalmente en forma de paralelepípedo. Puede ser concebida para trabajo al vacío o para permitir una circulación natural o forzada [McCabe, et al, 1991].

El producto a secar se dispone sobre rejillas colocadas sobre una especie de carro que puede retirarse del recinto. Este tipo de secador se usa comúnmente para el tratamiento de pastillas, granulados, grageas, botellas o ampollitas en la industria farmacéutica; para frutas, hierbas, legumbres y productos de panadería en la industria de alimentos; para granulados, cristales y polvos en la industria química. Permiten un secado bajo condiciones leves, y un control adecuado del tiempo de secado de los productos [Robayo, 2000].

2.8.3 Secador Rotatorio

El secador rotatorio, también conocido como secador de tambor es ampliamente usado para secar materiales en la industria del cemento, industria de los minerales, industria de materiales de construcción, industria química, industria de alimentos, industria de fertilizantes, etc. Algunos productos granulares o cristalinos, pueden ser secados en un secador de este tipo. Estos consisten de una coraza cilíndrica, con un ligero ángulo con respecto a la horizontal, y montada sobre rodillos de manera que puede ser rotada. El material a secar se alimenta en el extremo más alto del secador, y por rotación del secador, usualmente auxiliada por aletas internas, avanza gradualmente hacia el otro extremo, donde es descargada. La fuente de calor para un secador rotatorio es el aire que circula a través del secador. El calor también puede ser provisto desde al exterior hacia la coraza del secador. Las variables a controlar en un proceso de secado por contacto son:

- a.) La velocidad de giro del tambor, que determinará la velocidad de producción y el nivel de humedad obtenido.
- b.) El contenido inicial de sólidos del producto [Robayo, Olga, 2000].

2.8.4 Secado en lecho estático y Fluidizado

El uso de este tipo de secadores está muy extendido. El producto fragmentado se pone en suspensión en el aire, que tiene una triple función: portador del sólido, fuente de calor y acarreador de la humedad extraída. Estos aparatos presentan características interesantes [McCabe, 1991].

- Pueden funcionar en continuo o en discontinuo.
- el producto puede ser bien mezclado, lo cual es favorable a la uniformidad del secado en discontinuo.

La temperatura y el contenido promedio de humedad del producto fluidizado, están en equilibrio con las del gas que sale del secador. La distribución igual del sólido en un funcionamiento continuo, conlleva una distribución muy grande de los tiempos de residencia, desfavorable a una buena calidad de tratamiento. Se han puesto a punto diferentes artificios para mejorar la distribución de los tiempos de residencia, y particularmente el control del avance del sólido, por medio de la instalación de un sistema de guías en espiral en lechos circulares, y transversales en los lechos rectangulares.

Por otra parte, a pesar de la recirculación posible del producto seco, este tipo de aparato favorece la distribución desigual. Es más, si el producto posee una granulometría demasiado grande, los granos mayores tienden a acumularse en el fondo de la rejilla. Estos fenómenos

pueden reducirse por la vibración del lecho. Los lechos fluidizados pueden también construirse con etapas, lo que permite e realizar una recuperación óptima de la energía, tanto de los sólidos como del gas. El funcionamiento es comparable a un flujo continuo a contracorriente del gas y del sólido.

Además, los lechos fluidizados pueden adaptarse a un funcionamiento tipo flash [McCabe, 1991]. Un gran número de productos son secados actualmente en lecho fluidizado. Además de los productos químicos o minerales, podemos citar los colorantes, la sal de mesa, alimentos infantiles, azúcar de caña, caseína, quesos, café, chocolate, productos lácteos, etc [Perry, 1992].

2.8.5 Secador de lecho fluidizado

Cuando el fluido que interviene en la operación es un gas, la fluidización del sólido granular sigue un mecanismo algo diferente, aunque las relaciones entre el gradiente de presión y la velocidad resulten similares en todos los aspectos cuando el fluido es un líquido.

Mientras que en la fluidización por un líquido el comienzo del estado de fluidización viene señalado por un movimiento suave de oscilación de algunas de las partículas que constituyen el lecho, en la fluidización por un gas, el fluido comienza literalmente a "burbujear" a través del sólido, igual que un gas burbujea a través de un líquido.

Las burbujas del fluido gaseoso se elevan atravesando la capa y rompen en la superficie superior de la misma, salpicando hacia arriba unas cuantas partículas sólidas. Conforme la velocidad del fluido va aumentando, la acción del borboteo se hace más y más violenta, con proyección de "penachos" de polvo hasta distancias considerables por encima del lecho, que tardan en volver a caer al mismo.

La relación entre el número de Reynolds (basado en el diámetro de las partículas) y la porosidad; aunque las dificultades experimentales han hecho que la obtención de datos y de números de Reynolds próximos al estado de sedimentación libre, resulte muy difícil [McCabe, 1991].

2.8.6 Secador de bandejas.

En un secador de charolas, los alimentos son introducidos en charolas que son colocadas dentro de una cámara de deshidratación, donde circula aire caliente. Consiste en un gabinete suficientemente grande para colocar los alimentos a secar. Generalmente en estos secadores, el aire fluye transversalmente a través de las bandejas. La finalización del proceso de secado, consisten en la eliminación del agua del material, hasta que la humedad de dicho material

alcanza el equilibrio del aire que lo rodea; es decir que la presión de vapor de la humedad del sólido es igual a la presión parcial de la corriente gaseosa [Treybal, 1999].

Un secador de charolas o bandejas es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan en grupos de charolas en el caso de sólidos particulados. La transmisión de calor puede ser directa del gas a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o indirecta, utilizando repisas o bases calentadas, ser pertinentes de radiador o paredes refractarias al interior de la cubierta.

En unidades de calor indirecto, exceptuando los equipos de repisas al vacío, casi siempre se necesita la circulación de una pequeña cantidad de gas para eliminar el vapor de humedad del comportamiento y evitar la saturación y condensación del gas. Las unidades de compartimientos se emplean para calentar y secar madera, cerámica, materiales en hojas (sostenidas en postes), objetos pintados y metálicos, y todas las formas de sólidos particulados.

El funcionamiento satisfactorio de los secadores de charolas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo del material que se esté secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado.

La corriente de aire adecuada para este género de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados.

La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de charolas. Los secadores de charolas pueden ser del tipo de carretillas de charolas o de charolas estacionarias.

En el primer caso, las charolas se cargan sobre carretillas que se empujan hasta el interior del secador y, en el segundo, las bandejas se cargan directamente en bastidores fijos dentro del secador. Las carretillas están provistas de ruedas con pestaña que corren sobre carriles, o bien, de ruedas planas giratorias. También se pueden suspender de monorrieles sobre los cuales se desplazan.

Las bandejas cuentan por lo común con dos hileras de bandejas, cada una de las cuales tiene de 18 a 48 charolas, según sean las dimensiones de éstas. Las bandejas pueden ser cuadradas o rectangulares, con una superficie de 0.37 a 0.75m²/bandeja y se fabrican de cualquier

material que sea compatible con las condiciones de corrosión y temperatura prevalecientes [Aleyda P. H, 2006].

2.8.7 Secadores solares

En muchos países del mundo, el uso de sistemas de energía solar térmica en el área agrícola para conservar verduras, frutas, café y otros cultivos ha demostrado ser práctico económico y responsable con el ambiente. Sistemas de calefacción solar para secar alimentos y otros cultivos pueden mejorar la calidad del producto, mientras que la reducción de desperdicios en combustibles fósiles tiende a mejorar la calidad de vida.

Secadores de productos alimenticios basados en energía solar están disponibles en una gama de tamaños y diseño y son utilizados para el secado de diversos productos. Se ha encontrado que varios tipos de secadores están disponibles para satisfacer las necesidades de los agricultores y/o industriales del campo.

Por lo tanto, la selección de los secadores para una aplicación en particular es en gran parte una decisión basada en lo que está disponible. Una revisión exhaustiva de los diversos diseños, detalles de construcción y principios operativos de la amplia variedad de diseños nos lleva a dos grupos genéricos de secadores de energía solar, a saber, pasiva o de circulación natural y activa o convección forzada [Atul Sharma, 2008].

2.9 Descripción del sistema en estudio

El sistema (Figura 3) cuenta con un conjunto de colectores cuya energía captada es almacenada en un termotanque, además cuenta con un calentador auxiliar que calentará el aire directamente en el horno. En el intercambiador de calor, el flujo másico de agua está ligado a la demanda de flujo másico de aire. Una vez que el flujo másico de agua transfiere energía al flujo másico de aire, el flujo másico de agua retorna al termotanque y el flujo másico de aire caliente es llevado al secador. El sistema considera que el aire es tomado del ambiente y que tanto la temperatura como la humedad varían a lo largo del año.



Figura 3: Diagrama de los principales componentes involucrados en el sistema de horno

En un sistema térmico solar común en el secado se utilizan los colectores para calentar aire, sin embargo, esta energía es usualmente utilizada cuando existe poca demanda de energía (baja capacidad de secado). De igual forma sucede con el secado tradicional, en donde se calienta aire por medio de gas o electricidad, no obstante, debido a que el calor específico del aire es muy bajo, es muy poca la recuperación de energía que se podría obtener.

2.9.1 Sistema de captación de energía Solar

2.9.1.1 Colectores Solares

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transformarla energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5 μm) y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar como máximo, flujos de 1100 W/m^2 . De esta forma, un análisis de colectores solares presenta problemas relacionados con radiación y flujos de energía pequeños y variables. Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C. Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y

difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos [Pillajo García & castillo Olalla, 2007].

2.9.1.2 Colector solar de placa plana

Un colector solar (Figura 4) transforma la energía solar incidente en otra forma de energía útil. Difiere de un intercambiador de calor convencional en que en éstos se realizan intercambios térmicos entre fluidos con elevados coeficientes de transferencia térmica, y en los que la radiación es un factor sin apenas importancia; en un colector solar, la transferencia térmica se realiza desde una fuente energética, (el Sol), a un fluido, sin concentración de energía solar, por lo que el flujo incidente puede ser del orden de 1 kW/m variable con una serie de parámetros.

La gama de longitudes de onda que se aprovecha está comprendida entre 0,3 μm y 3,0 μm , que es una franja de radiación considerablemente más pequeña que la de la radiación emitida por la mayoría de las superficies que absorben energía [Kalogirou, 2009].

El análisis de los colectores solares implica problemas particulares de flujos de energía, bajos y variables, así como una gran relevancia de los fenómenos de radiación. En los colectores de placa plana, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta.

Se pueden diseñar colectores de placa plana para trabajar con temperaturas de placa absorbente

comprendidas entre 40 °C y 130 °C.

Estos colectores utilizan tanto la radiación solar directa como la difusa, no requieren de sistemas de seguimiento solar y prácticamente no precisan de mantenimiento. Sus aplicaciones van enfocadas a sistemas de calentamiento de agua, calefacción de edificios y aire acondicionado.

El coste de la energía obtenida en un colector de placa plana depende del rendimiento térmico del sistema, de su vida media y de los costes de fabricación. Mediante un balance energético se puede hallar la distribución de la energía solar incidente sobre un colector de placa plana, su transformación en energía útil y las pérdidas térmicas [Kalogirou, 2009].



Figura 4: Colectores solar de placa plana

2.9.1.3 Tanque de almacenamiento

El uso de un tanque de almacenamiento térmico (Figura 5) es usualmente requerido en los sistemas térmicos solares para los periodos de tiempo cuando el recurso solar no está disponible y existe una demanda de energía. Este tanque no se encuentra presurizado y se considera lleno de agua. El agua es utilizada como medio de almacenamiento, debido a que tiene un calor específico alto, bajo costo y no es tóxico a diferencia de otras sustancias.



Figura 5: Un termo tanque y su conexión básica

2.9.1.4 Bomba

La bomba (Figura 6) es utilizada para mover un flujo másico de agua constante de $0.02 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$. Este flujo proviene del tanque de almacenamiento y se hace circular por el

colector solar. Después, el flujo es llevado de vuelta al tanque de almacenamiento con un aumento en su temperatura. La bomba de flujo del agua con el sistema se aprende cuando la temperatura del agua de la red tiene que ser 3 °C de la temperatura del agua que está saliendo en los colectores solares, y se apagar cuando la temperatura del agua de entrada es igual o menor a la temperatura de agua que está saliendo en los colectores solares



Figura 6: Una bomba eléctrica para empujar el agua

2.9.1.5 Control

El encendido y apagado de la bomba depende de un control de temperaturas. Este control mide la temperatura en la salida del tanque de almacenamiento y lo compara con la en la salida del colector. Al ser mayor la temperatura del fluido en la salida del colector entonces la bomba enciende, siempre y cuando el tanque no tenga una temperatura mayor a 70 °C hasta 90 °C para evitar ebullición.

2.9.1.6 Control (válvulas)

Este control mantiene la temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor, y lo hace regulando el flujo másico del agua según requiera mayor o menor flujo másico a del intercambiador de calor [Stoecker, 1989].

2.9.2 Ahumador

El ahumador (Figura 7) es simplemente un horno de secado con la capacidad de aplicar humo. La densidad del humo, la humedad superficial, la humedad del aire, la temperatura, y la circulación de aire afectan la deposición del humo. La acumulación de humedad superficial forma deposición desigual del humo. La producción de una atmósfera de humo denso y condiciones donde el humo se deposita uniformemente sobre la superficie de cada pieza, puede asegurar un buen sabor, color, y la preservación de la superficie [Keey, 1980].



Figura 7: Ahumado

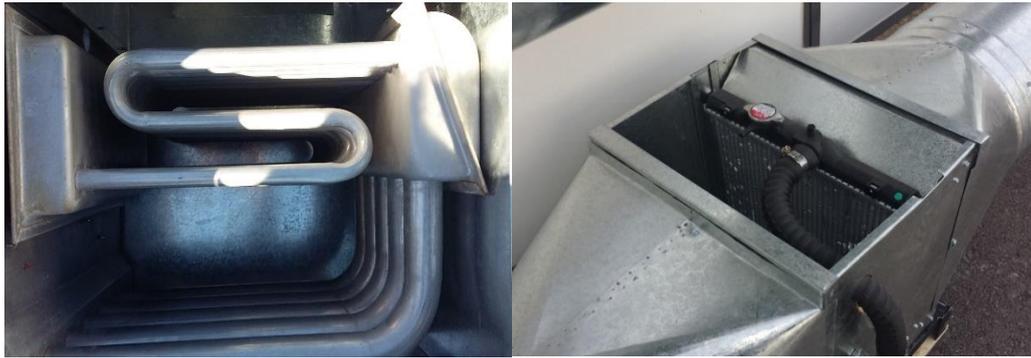
2.9.3 Intercambiador de Calor

Intercambiador de calor (Figura 8) es el dispositivo que realiza el proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida. Sus aplicaciones específicas son en calefacción, aire acondicionado, producción de energía, recuperación de calor residual y procesamiento químico [Incropera, Dewit, 2003].

En este caso, será el encargado de proveer aire caliente al sistema de secado. Además, se contará con un recuperador de calor en la salida del horno. El recuperador de calor servirá para aumentar la eficiencia en el consumo de energía en el sistema.

Debido a que el objetivo es calentar aire por medio de agua el intercambiador de calor adecuado según la literatura es una clase especial que se utiliza para lograr una muy grande superficie de transferencia de calor por unidad de volumen. Estos son denominados intercambiadores de calor.

En el proceso de secado de alimentos es muy usado el sistema que por medio de aire caliente se retira la humedad del producto, en varias configuraciones de procesos de secado se calienta directamente el aire, pero para este sistema en especial se requieren grandes cantidades de aire caliente y el calentar el aire y almacenarlo directamente resulta incosteable por voluminoso; por este motivo resulta conveniente calentar agua, que tiene una capacidad calorífica específica, C_p , más alta que el aire y almacenar la energía en el agua, para posteriormente por medio de un intercambiador de calor transmitir la mayor cantidad de energía posible al aire.



(a)

(b)

Figura 8:(a) Esquema (a) Es una recuperación de calor y (b) es un intercambiador de calor

2.9.4 Localización Geográfica

El sistema de secado se simula para las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México. Esta localización presenta una combinación de factores geográficos, como su topografía, altitud y latitud que provocan condiciones climáticas severas en el invierno con temperaturas que van desde los $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ por la noche, hasta los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el día.

Estas condiciones se deben en gran parte a la altitud sobre el nivel del mar y a la baja humedad del aire. La humedad tiende a atrapar la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre. Por lo tanto, en ausencia de humedad, esta radiación tiende a perderse hacia la atmósfera, enfriándose tanto la superficie como el aire del medio circundante [Martín, 2004].

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Definición Física del Proyecto

Se realizarán las corridas de simulación para el diseño del horno y el diseño del sistema de recuperación de calor.

En el análisis de diferentes configuraciones para el diseño del sistema que simule las características y condiciones de funcionamiento, para reducir hasta un 10% la humedad, de 4375kg de chile chipotle; se diseñó un sistema que funciona de la siguiente manera:

- Los colectores solares de placa plana calientan agua, hasta una temperatura de operación que evite presurizar el sistema.
- El agua es posteriormente almacenada en termotanque, este paso es importante, ya que el suministro solar es inconstante y debemos contar con una manera de almacenar la energía suministrada por el sol en las horas de mayor insolación.
- Un sistema de bombeo extrae el agua de los termos tanques y hace pasar el agua por el intercambiador de calor para asegurar que el agua lleve la temperatura óptima para entrar al intercambiador de calor.
- En el intercambiador de calor de flujo cruzado, el agua cede energía térmica al aire, el cual entra a temperatura ambiente.
- El aire al pasar por el intercambiador de calor, eleva su temperatura y en consecuencia disminuye su humedad relativa y aumenta su capacidad de retirar humedad al producto.

(ϕ), en este momento al aire le corresponde un cierto valor de humedad absoluta (w_1); este aire caliente y seco entra a la cámara de secado y mediante un proceso de saturación adiabática remueve humedad al producto. El aire sale de la cámara de secado con menor temperatura y con una humedad (w_2) mayor; dependiendo de la eficiencia del secador.

A la diferencia de humedad absoluta ($\Delta\omega$), la llamamos gradiente de humedad absoluta y al multiplicarlo con el flujo másico de aire (\dot{m}) que entra a la cámara de secado, podemos determinar la cantidad de cascara de chile que podemos secar por hora.

El diseño propuesto utilizará colectores solares para calentar agua y no aire, con la finalidad aprovechar el beneficio de almacenar el exceso de energía producido durante en algunas temporadas del año, para poder utilizarlo cuando existe ausencia de radiación solar. Esto se debe a que el agua tiene un calor específico más alto que el aire y que es posible su almacenamiento económico en un termotanque que mantiene esa energía disponible para ser utilizada posteriormente en el proceso. En realidad, también el aire se puede almacenar, pero no es muy atractivo.

3.2 Determinación de la Geometría del Secador

El diseño de un secador debe tomar en cuenta las características del sólido a secar, esto para definir el modelo de transferencia de calor y masa que describe el secador.

- Los factores internos: son el tipo de material, espesor y contenido de humedad inicial final del producto.
- Los factores externos: son la intensidad solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad de circulación del aire, etc.

El primer dato necesario para el cálculo es el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h). Para el cálculo del coeficiente de la cama de chile, se asume que se trata de una placa plana.

Esto debido a que se vuelve un cálculo complicado el tomar en cuenta cada trozo de chile, ya que cada uno de ellos tiene una dimensión diferente, por lo que se decidió suponer el chile como una sola pieza de material homogéneo extendida y con un espesor uniforme. Se desprecian las áreas de los cortes laterales de cada trozo de chile. El flujo del aire caliente corre constante y paralelo a la superficie del chile [Karely, 2013].

3.3 Simulación Numérica

La variabilidad natural de los parámetros que influyen en el comportamiento del sistema con energía solar, tales como son la temperatura ambiente y la irradiación solar disponible, hacen

necesaria la utilización de herramientas de cómputo especializadas para simular el comportamiento térmico de los sistemas sobre periodos extendidos de tiempo.

La simulación numérica es una herramienta que permite predecir el comportamiento de estos fenómenos físicos que se presentan comúnmente en el área de ingeniería, sin necesidad de recurrir a la experimentación. La simulación de sistemas, ha tenido gran aceptación como herramienta de análisis de energía en diferentes aplicaciones. Gracias a la simulación es posible hacer un análisis y evaluación de los requerimientos de energía del sistema propuesto aun en la etapa de diseño, pero también puede ser utilizada para explorar ahorros potenciales [Stoecker, 1989].

En este trabajo se utilizará la simulación numérica para determinar la capacidad óptima de los intercambiadores, ventiladores, termo tanque y estrategias de operación óptimas para la alta producción o bien alta eficiencia.

3.3.1 TRNSYS

TRNSYS 16 es un programa de simulación dinámica de sistemas del campo de ingeniería y de las energías renovables, que ayuda a optimizar la eficiencia tanto térmica como económica de diferentes sistemas.

Este es un software comercial desarrollado en la Universidad de Wisconsin. El programa contiene modelos de una gran variedad de dispositivos (tales como colectores, bombas, válvulas, tuberías, etc.) o modelos con los que simula su comportamiento. Este es posible conectar entre si los modelos de los componentes y obtener el comportamiento del sistema completo en estado transitorio considerando la variabilidad anual climática de la localidad.

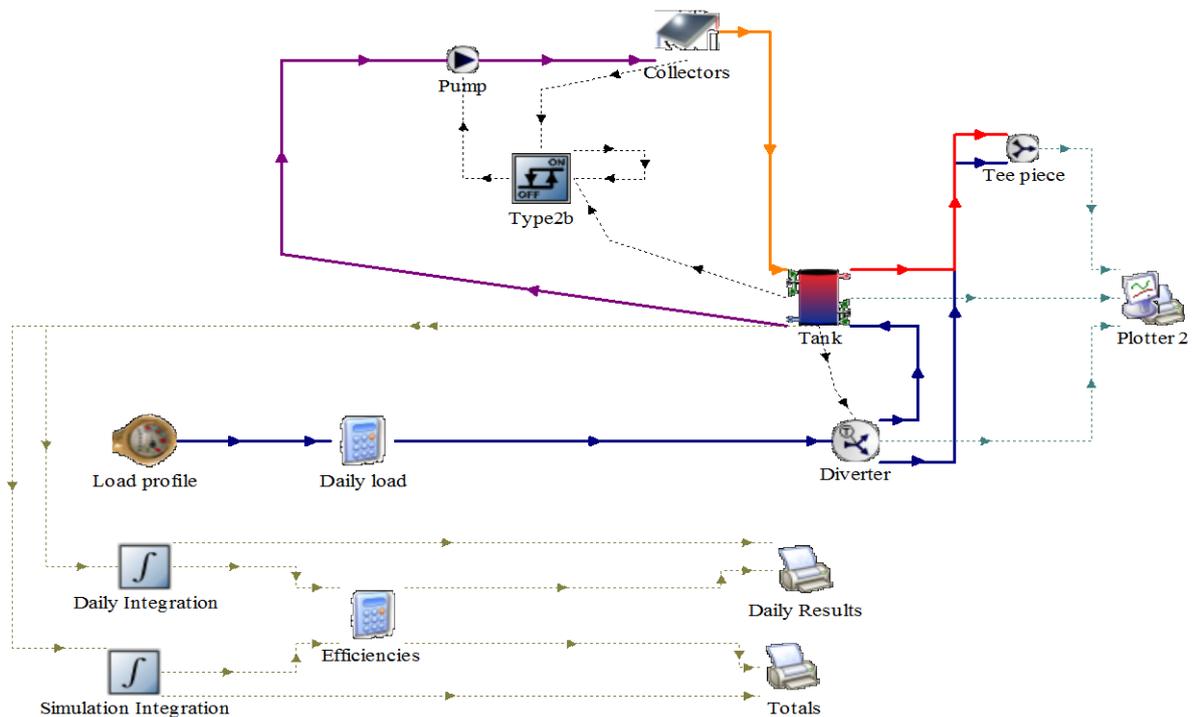


Figura 10: Diagrama esquemático de un colector de placa plana

Este programa puede realizar cálculos en espacios de tiempo programados por el usuario y una manera de visualizar resultados es por medio de graficas que expresa en función del tiempo (horas).

El software de simulación TRNSYS también puede ser utilizado para la identificación de parámetros en sistemas térmicos solares [Almeida et al, 2014].



Figura 11:TRNSYS 16

En este estudio de simulación se utilizará un tablero de trabajo para el diseño del sistema térmico en donde se visualizan los componentes involucrados. Cada uno de estos componentes será estudiado y configurado con la información técnica adecuada para su correcta integración en el sistema. Se requiere la integración de varios módulos para obtener el sistema de captación de energía solar y de calentamiento de aire.

En este sistema están integrados todos los componentes necesarios para calentar el aire en el horno. Es importante mencionar que el módulo de secado no se encuentra en esta simulación, debido a que TRNSYS no cuenta con un módulo de secado. Sin embargo, la simulación del sistema provee los requerimientos necesarios para el proceso de secado. Además, como información complementaria a la simulación del sistema de secado, se realiza la simulación del horno en el software Matlab y los colectores y termotanque se simularán en TRNSYS 16.

3.4 Análisis de la variación paramétrica

Los resultados que se obtendrán de las corridas de humedad y aire constante dentro de la cama del chile, estarán ordenados en forma de líneas, a las cuales se les aplicará un filtro ordenando de menor a mayor el consumo de energía. A través de ese análisis tendrían analizar los parámetros de variación de la temperatura dentro del horno. Los análisis paramétricos son de mucha utilidad en los diseños de ingeniería ya que ayudan a analizar una mayor cantidad de soluciones posibles y determinar entre ellas la óptima. Resolver matemáticamente un problema de ingeniería es una forma de encontrar una solución; solo que la relación entre variables nos puede dar una infinidad de soluciones, y hacer los cálculos para cada una de ellas resulta en mucho tiempo invertido y cabe la posibilidad de imprecisiones. Mediante el análisis paramétrico; y apoyados en TRNSYS EDIT y Microsoft Excel podemos, sin invertir mucho tiempo analizar una gran variedad de parámetros, una gran cantidad de veces y posteriormente optimizar nuestro diseño.

3.5 Secador

El secado se llevó a cabo dentro del concepto de evaporación del contenido de humedad del Chile con lo que se realizó una simulación a temperatura ambiente y otra simulación usando la temperatura promedio de 77 °C.

La temperatura y la velocidad del aire son constantes mientras que la humedad del aire y la temperatura ambiental son transitorias, por lo que cambia la energía demandada para el calentamiento y evaporación.

La temperatura es mantenida por el intercambiador de calor y el flujo del aire por un ventilador que trabaja a una sola velocidad. La información de temperatura ambiente, humedad relativa, humedad absoluta y densidad del aire son obtenidos de TRNSYS.

El contenido de humedad inicial en el producto es de 90% y debido a que al final conserva un 10% de humedad, esta se descuenta de la cantidad de masa de agua que se evaporara. Es importante mencionar que la simulación del secador proporciona de acuerdo a las

dimensiones y masa del producto a secar las condiciones del aire antes de entrar al secador y las condiciones del aire al salir del secador.

3.6 Ciclo del aire

El objetivo general de este trabajo es aportar la energía que se requiere para secar chile chipotle, y el método que se propone es el de secado por convección forzada; así que, el insumo principal para el proceso es aire caliente ($77\text{ }^{\circ}\text{C}$), con una humedad relativa (ϕ) baja para que al entrar a la cámara de secado sea capaz de remover la mayor cantidad posible de agua del producto.

El aire entra impulsado por un abanico a un intercambiador de calor de flujo cruzado bajo condiciones ambientales, en su paso por el intercambiador de calor recibe energía térmica del agua que va a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y eleva su temperatura hasta la óptima de operación. La humedad relativa del aire es dependiente de la humedad absoluta que tenga el aire y de la temperatura, por lo que tenemos una variable inconsistente durante todo el año.

CAPITULO IV

4. MODELO MATEMÁTICO

Un modelo matemático describe teóricamente un objeto que existe fuera del campo de las matemáticas. Las previsiones del tiempo y los pronósticos económicos, por ejemplo, están basados en modelos matemáticos. Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí. Básicamente, en un modelo matemático advertimos 3 fases:

- La construcción, proceso en el que se convierte el objeto a lenguaje matemático;
- El análisis o estudio del modelo confeccionado;
- La interpretación de dicho análisis, donde se aplican los resultados del estudio al objeto del cual se partió.

Para el diseño del secador se tomó en cuenta la geometría básica del batch. Partiendo de la cantidad de masa húmeda a secar. El chile tiene determinado contenido de humedad, debido a que la masa del chile se constituye de chile seco y de agua.

$$M\% = \frac{m_w}{m_T} \quad 1)$$

$$m_w = m_T * M\% \quad (2)$$

4.1 Evaporación del agua

En la cámara de secado se pretende secar la mayor cantidad de agua posible en el chile. El proceso más sencillo para evaporar agua está basado en la saturación adiabática. Este proceso es utilizado en sistemas de enfriamiento evaporativo convencionales [Tang & Etzion, 2004]. Menciona las diversas expresiones experimentales y teóricas para predecir la tasa de evaporación de agua libre en las superficies hacia el ambiente.

Algunas de esas expresiones incluyen no solo los efectos de la corriente del aire sobre la superficie mojada, sino también la diferencia de la temperatura entre la superficie mojada y la temperatura del aire.



Figura 12:Enfriamiento evaporative

La evaporación del agua que se encuentra en la superficie del chile, depende de la temperatura del agua del chile, temperatura del aire, humedad actual del aire y la velocidad con la que pasa el aire sobre la superficie del chile.

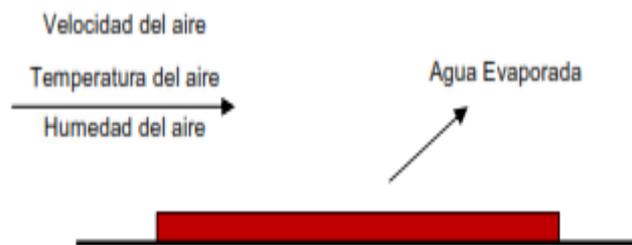


Figura 13:Evaporativo de agua

4.2 Presión de saturación

El agua tiene, a cada presión, una temperatura de saturación o ebullición; del mismo modo, a cada temperatura hay una presión en la que se produce el cambio de fase líquido-vapor.

La presión de saturación del agua puede obtenerse a través de la siguiente correlación (válida entre 0 y 150 °C):

$$P_{sat} = (610.78)e^{\left[\frac{17.08085(T)}{T+234.175}\right]} \text{ [kPa], } T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

4.3 Humedad Relativa

La humedad relativa ϕ es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido en cierta masa de aire y el que éste contendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura.

La humedad relativa también es la relación entre la presión de vapor y la presión de saturación a la misma temperatura [Gelys, Guanipa, 2010].

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (4)$$

4.4 Humedad específica

Indica cuántos kilogramos de vapor de agua acompañan a cada kilogramo de aire seco. Se relaciona con la presión parcial de vapor como sigue:

$$Y = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (5)$$

El factor 0.622 es el cociente de los pesos moleculares de agua y aire seco [Yunus A. Cengel, 2003].

4.5 Densidad del Aire húmedo [Kg aire húmedo/m³]

$$\rho_{ah} = \rho_a + \rho_v$$

Considerando gases ideales: $\rho_a = \frac{(P - P_v)M_a}{RT}$ $\rho_v = \frac{P_v M_v}{RT}$

Donde M_a es el peso molecular del aire = 28.97 Kg/kg-mol

M_v es el peso molecular del agua = 18.016 Kg/kg-mol

Flujo másico del aire húmedo [kg aire húmedo/m³]

$$m_{ah} = \rho_{ah} F_{ah}$$

Donde F_{ah} es el flujo volumétrico [m³/s]

Velocidad del aire húmedo [m/s]

$$V_{ah} = \frac{F_{ah}}{A_{ah}}$$

Donde A_{ah} es el área de sección transversal por donde circula el aire húmedo [m²]

Entalpía de una mezcla del aire seco y vapor de agua [kJ]

La entalpía de una mezcla de aire seco y vapor de agua es la suma de las entalpías de cada uno de los componentes individuales:

$$H_{aire\ húmedo} = H_{aire\ seco} + H_{vapor\ de\ agua} \quad (6)$$

Entalpía específica del aire húmedo por kg de aire seco [kJ/kg aire seco]

Por unidad de masa de aire seco, la entalpía específica se expresa

$$h = h_a + Yh_v \quad (7)$$

La entalpía del aire seco se puede calcular utilizando expresiones sencillas:

$$h_a = h_{a,ref} + Cp_a(T - T_{ref}) \quad (\text{aire seco}) \quad (8)$$

$$h_v = h_{g,ref} + Cp_v(T - T_{ref}) \quad (\text{vapor de agua}) \quad (9)$$

$$h_f = h_{f,ref} + Cp_{liq}(T - T_{ref}) \quad \text{agua líquida} \quad (10)$$

Suele tomarse como referencia:

$$T_{ref} = 0^\circ\text{C}$$

$$h_{a,ref} = 0$$

$$h_{g,ref} = h_{fg,0} = 2501.6 \text{ [kJ/kg aire seco]}$$

$$h_{f,ref} = 0$$

Los calores específicos se pueden obtener a través de las siguientes correlaciones:

Cp aire [J/kg K] válida en el intervalo de temperatura 220-380K

$$Cp_{aire} = 1.045356 \times 10^3 - 3.161783 \times 10^{-1}(T) + 7.083814 \times 10^{-4}(T^2) - 2.705209 \times 10^{-7}(T^3) \quad (11)$$

$$Cp) \text{ agua liq [kJ/kmol.K]}$$

$$Cp_{liq} = 92.053 - 3.9953 \times 10^{-2}(T) - 2.1103 \times 10^{-4}(T^2) + 5.3469 \times 10^{-7}(T^3) \quad (12)$$

$$Cp \text{ vapor de agua [kJ/kg molK]}$$

$$Cp_{vap} = 32.24 + 0.01924(T) + 1.055 \times 10^{-5}(T^2) - 3.596 \times 10^{-9}(T^3) \quad (13)$$

Calor latente de vaporización [J/kg] Temperatura en K

$$h_{fg} = 3.4831814 \times 10^6 - 5.8627703 \times 10^3(T) + 1.2139568 \times 10^1(T^2) - 1.40290431 \times 10^{-2}(T^3) \quad (14)$$

Por lo tanto, podemos resumir:

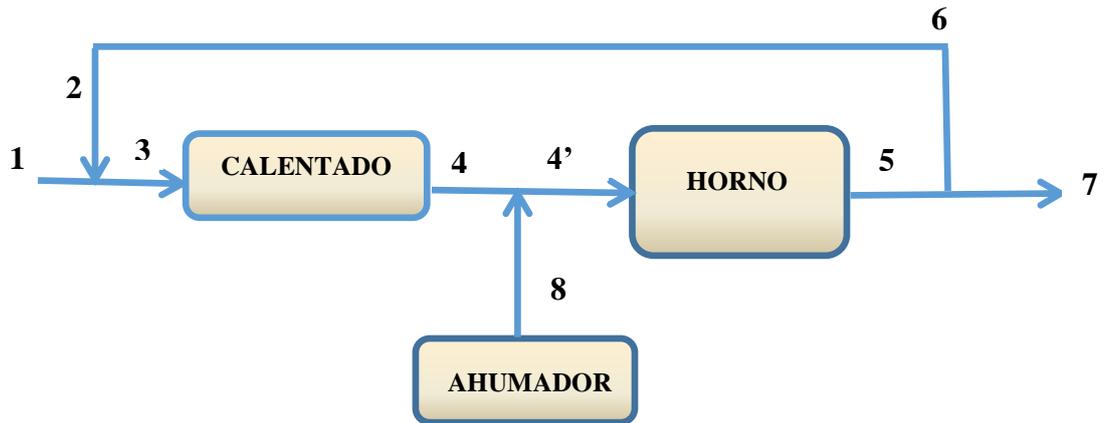
$$h_f = Cp_{liq}(T) \text{ [kJ/kg] temperatura en } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$h_v = 2501.6 + Cp_v(T) \text{ [kJ/kg] temperatura en } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

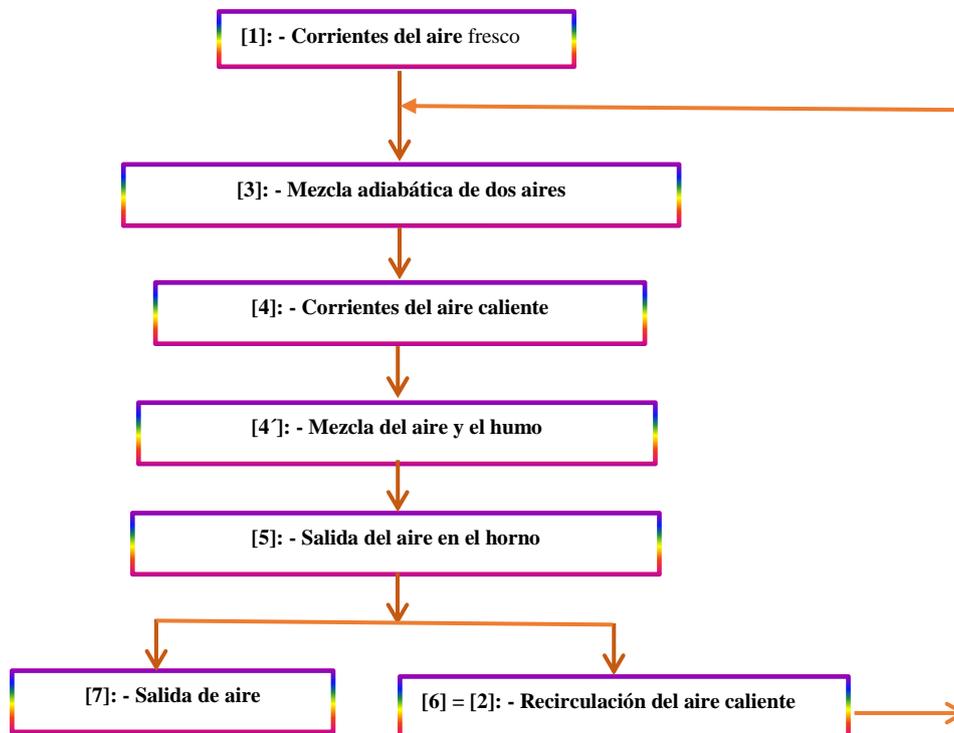
$$h_g = h_{fg} + h_f \text{ [kJ/kg] temperatura en } ^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$h_a = Cp_a(T) \text{ [kJ/kg aire seco] temperatura en } ^\circ\text{C} \quad (18)$$

Como se describe balance de energía y la masa en el horno, la corriente de aire que sale del secador contiene más agua que en la entrada, pero su temperatura es todavía alta. Por esta razón, la energía contenida en esta corriente es utilizada generalmente por recirculación. Ahora bien, ya que su contenido de agua no permitiría una buena aplicación en el secador, esta corriente se mezcla con una corriente de aire fresco con un menor contenido de humedad. Antes de introducir la mezcla al secador, se pasa a través de un calentador para aumentar su contenido de entalpía. [Bruin & Luyben, 1980].



a) Componentes del sistema del horno



b) Descripción de Corrientes

Figura 14: Diagrama de bloques para ilustrar los procesos del sistema de estudio

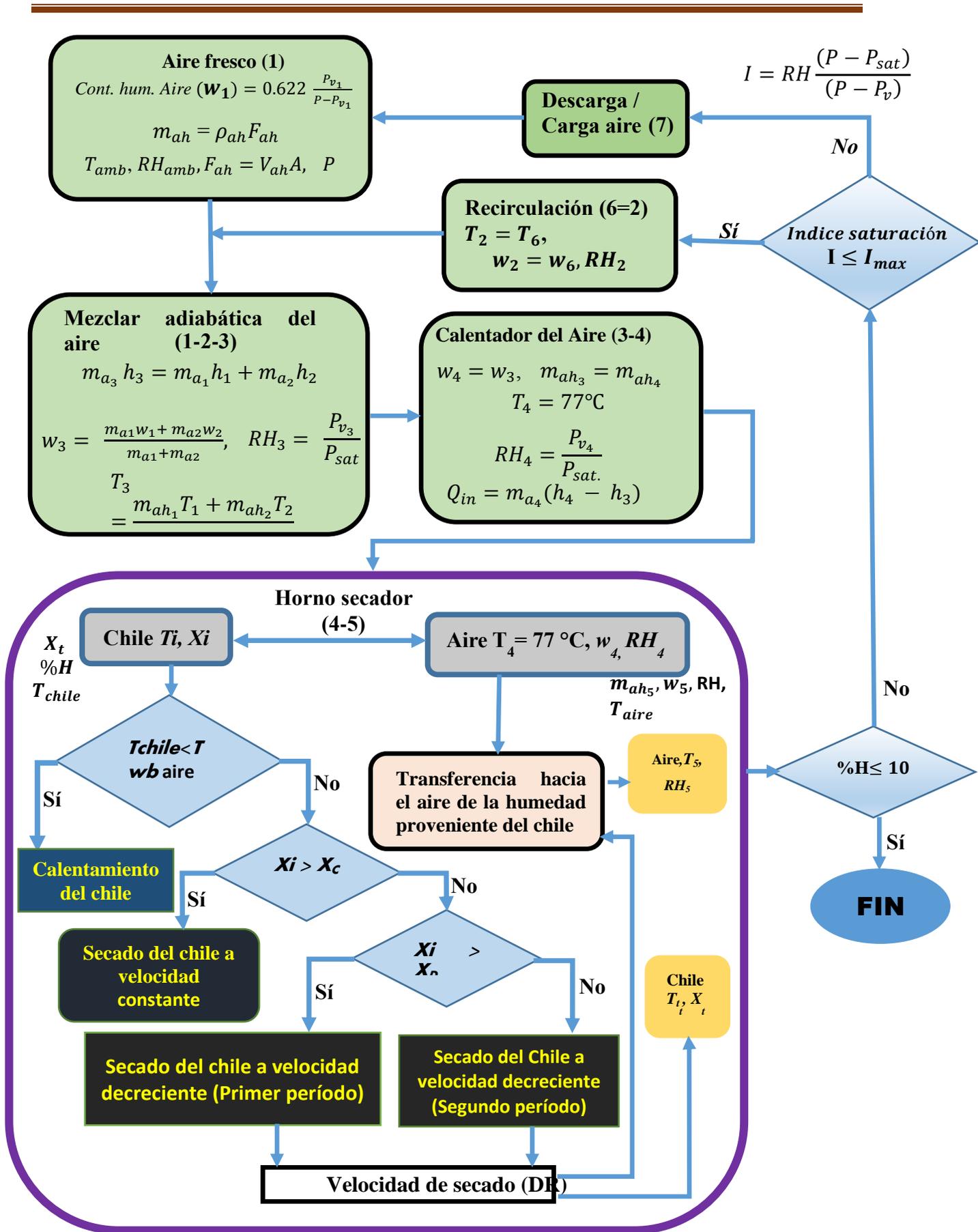


Figura 15: El diagrama de flujo del sistema (Algoritmo)

4.6 Corriente de aire fresco

Una corriente de aire fresco es suministrada a una temperatura ambiente y con una humedad relativa ϕ_1 . Es decir, estas propiedades varían con respecto al tiempo dependiendo de las condiciones ambientales.

Por lo tanto, el flujo másico de aire fresco puede ser calculado

$$m_{ah_1} = \rho_{ah} F_{ah} = V_{ah} A_{ah} \text{ [kg aire húmedo/s]} \quad (19)$$

Si expresamos el flujo másico de aire húmedo como la suma de flujo másico de aire seco y flujo másico de vapor de agua, tendremos:

$$m_{ah_1} = m_{a_1} + m_{v_1} \quad (20)$$

Donde los sub-índices representan:

El flujo másico del vapor de agua puede ser determinado:

$$m_{v_1} = m_{a_1} Y_1 \quad (21)$$

Donde

$$Y_1 = 0.622 \frac{P_{v_1}}{P - P_{v_1}} = 0.622 \frac{\phi_1 P_{sat_1}}{P - \phi_1 P_{sat_1}} \quad (22)$$

P_{sat_1} Puede ser estimado a través de la correlación

$$P_{sat_1} = (610.78) e^{\left[\frac{17.08085(T_1)}{T_1 + 234.175} \right]} \text{ [kPa], } T_1 \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

Por lo tanto,

$$m_{ah_1} = m_{a_1} + m_{v_1} = m_{a_1} (1 + Y) \quad (24)$$

De donde se deduce que:

$$m_{a_1} = \frac{m_{ah_1}}{(1 + Y)} \quad (25)$$

4.7 Mezcla adiabática del aire

La corriente de aire fresco se mezcla adiabáticamente con la recirculación de aire proveniente de la salida del horno.

La corriente de recirculación está a una temperatura T_2 mayor que la del aire fresco y tiene mayor humedad que el aire fresco.

Los balances de masa y energía pueden ser calculados a cualquier instante t , utilizando las siguientes expresiones:

Tabla 2: Balance de masa en parte de mezcla adiabática de aire

Componente	Corriente de aire fresco (1)	Recirculación de aire (2)	Mezcla adiabática de dos corrientes de aire (aire fresco + recirculación) (3)
Aire seco	$m_{a_1,t} = \frac{m_{ah_1,t}}{(1 + Y_{1,t})}$	$m_{a_2,t} = m_{a_6,t-1}$	$m_{a_3,t} = m_{a_1,t} + m_{a_2,t}$
Vapor de agua	$m_{v_1,t}$ $= (m_{a_1,t})(Y_{1,t})$	$m_{v_2,t} = m_{v_6,t-1}$ $= (m_{a_2,t})(Y_{2,t})$ $Y_{2,t} = Y_{6,t}$	$m_{v_3,t} = m_{v_1,t} + m_{v_2,t}$ $(m_{a_3,t})(Y_{3,t}) = (m_{a_1,t})(Y_{1,t})$ $+ (m_{a_2,t})(Y_{2,t})$ $Y_{3,t} = \frac{(m_{a_1,t})(Y_{1,t}) + (m_{a_2,t})(Y_{2,t})}{(m_{a_3,t})}$
Aire húmedo	$m_{ah_1,t}$ $= m_{a_1,t} + m_{v_1,t}$	$m_{ah_2,t} = m_{ah_6,t-1}$ $= m_{a_2,t} + m_{v_2,t}$	$m_{ah_3,t} = m_{ah_1,t} + m_{ah_2,t}$
<i>Balance de energía:</i>			$m_{a_3,t}h_{3,t} = m_{a_1,t}h_{1,t} + m_{a_2,t}h_{2,t}$ (26)

4.8 Calentador de Aire

La mezcla adiabática de las dos corrientes (aire fresco + recirculación) es alimentada a un calentador de aire donde pasará de la temperatura T_3 hasta la temperatura $T_4 = 77^\circ\text{C}$, que es la temperatura deseada para el suministro de aire al horno.

Tabla 3: Balance de masa en parte calentamiento de aire

Componente	Aire caliente (4)
Aire Seco	$m_{a_4,t} = m_{a_3,t}$
Vapor de agua	$m_{v_4,t} = m_{v_3,t}$ $(m_{a_4,t})(Y_{4,t}) = (m_{a_3,t})(Y_{3,t})$ $Y_{4,t} = Y_{3,t}$
Aire húmedo	$m_{ah_4,t} = m_{ah_3,t}$
<i>Balance de energía:</i>	$m_{a_4,t}h_{4,t} = m_{a_3,t}h_{3,t} + Qi$ (27)

Donde Q_{in} es la energía [kJ/s] que se requiere suministrar al calentador de aire para que el aire a la salida del calentador tenga una temperatura $T_4 = 77^\circ\text{C}$

4.9 Proceso de ahumado

El ahumado es una técnica de conservación alimenticia que consiste en someter alimentos a una fuente de humo proveniente de energía térmica realizados de aserrín. Este proceso, además de dar sabor al producto sirve el cómo conservador alargando el tiempo de conservación de los alimentos. Con el sistema diseñado se usa el aserrín como fuente de humo. Se estimó la energía que se libera en el proceso de combustión del aserrín, considerando la masa de aserrín y su poder calorífico (hc).

$$Q_{combustion} = hc \cdot m_{aserrin}$$

Dónde: $hc = 5000$ kJ/kg aproximadamente.

4.10 Proceso de secado

Durante el proceso de secado del chile chipotle en el horno, el aire suministra el calor sensible necesario, así como el calor latente de evaporación a la humedad. El aire también transporta el vapor de agua desde la superficie.

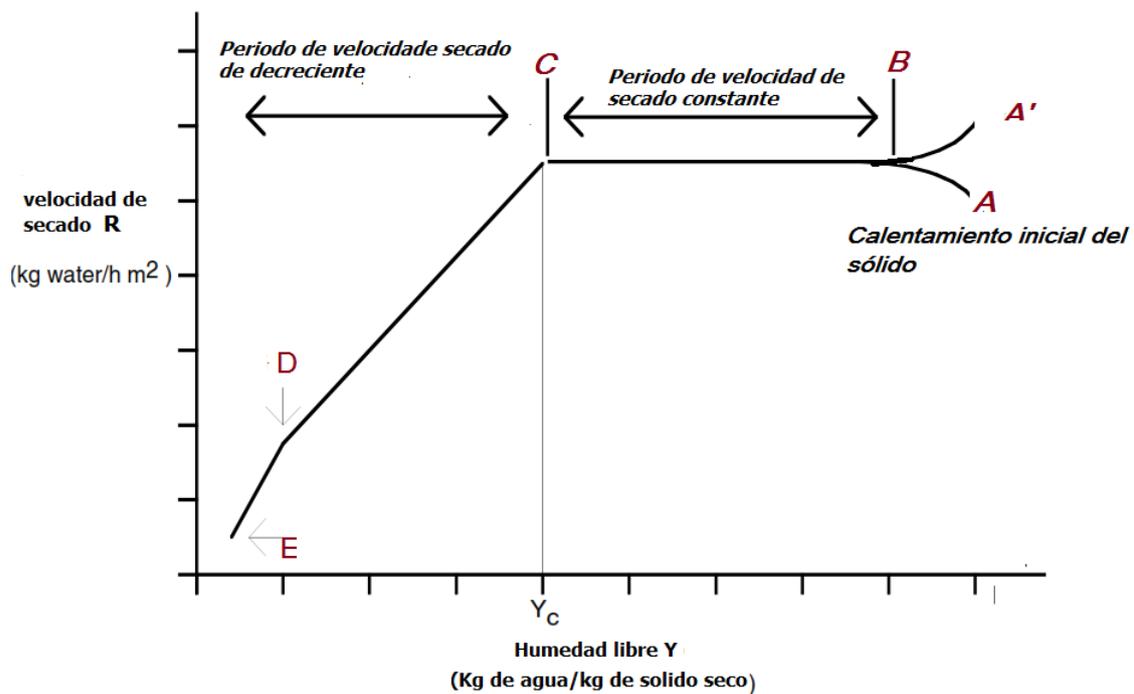


Figura 16: El diagrama de las etapas de secado

El proceso de secado se lleva a cabo en tres etapas

Etapa A-B. Calentamiento Inicial del Sólido: Esta sección representa el periodo de calentamiento durante el cual el material sólido es calentado por conducción de tal manera que la temperatura de la superficie del sólido se encuentre en equilibrio con las condiciones del aire utilizado para el secado. Normalmente, este periodo es de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que la temperatura de superficie es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado.

La temperatura de bulbo húmedo puede ser estimada de la humedad relativa y la temperatura del aire [Stull, 2011].

$$T_w = T \operatorname{atan}\left[0.151977(RH\% + 8.313659)^{1/2}\right] + \operatorname{atan}(T + RH\%) - \operatorname{atan}(RH\% - 1.676331) + 0.00391838(RH\%)^{\frac{3}{2}} \operatorname{atan}(0.023101RH\%) - 4.68603 \quad (35)$$

Donde, $RH\% = \phi * 100$

Tabla 4: Balance de energía etapa a-b.

Componente	Salida en el Horno (5)
Aire Seco	$m_{a5,t} = m_{a4,t}$
Vapor de agua	$m_{v5,t} = m_{v4,t} (m_{a5,t})(Y_{5,t}) = (m_{a4,t})(Y_{4,t}) \quad Y_{5,t} = Y_{4,t}$
Aire húmedo	$m_{ah5,t} = m_{ah4,t}$
Balance de energía:	$m_{a5,t}h_{5,t} = m_{a4,t}h_{4,t} - Q_{out} \quad (28)$
En el chile:	$Q_{out} = m_{a4,t}(h_{4,t} - h_{5,t}) \quad (29)$
	$Q_{out} = hA(T_4 - T_i) \quad (30)$
Velocidad de secado	$DR=0$

T_i = Temperatura inicial del chile chipotle.

Al final de esta etapa la temperatura de la superficie de chile chipotle T_s será aproximadamente igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire T_w .

Por lo que la energía necesaria en esta etapa para calentar el chile desde una temperatura inicial T_i hasta una temperatura final T_w , puede ser estimada como:

$$Q_{warming} = m_c C_{p_c}(T_w - T_i)$$

Donde m_c es la masa del chile [kg]

C_{p_c} Es el calor específico del chile, el cual se consideró como constante (3813 J/kg K).

Etapa B-C. Periodo de velocidad de secado constante: Es el lapso de secado durante el cual la velocidad de eliminación de agua por unidad de superficie deseada es constante o uniforme. En este periodo se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este periodo el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. Durante este periodo la superficie del material permanece saturada con agua líquida debido a que el movimiento de agua dentro del material a la superficie es el mismo que la velocidad de evaporación. La velocidad de secado depende de la velocidad de transferencia de calor hacia el aire y es igual a la velocidad de transferencia de masa.

La velocidad del secado se mantiene constante si el aire tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el aire se enfría, la velocidad de secado decrece, pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este periodo la temperatura del sólido se mantiene igual a la del bulbo húmedo del aire, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento. Se asume que la evaporación se lleva a cabo a la temperatura de la superficie del material. La temperatura del aire permanece constante, hasta que se alcanza el contenido de humedad crítico, entonces la velocidad de secado empieza a decrecer.

Durante el periodo de velocidad de secado constante la velocidad de transferencia de masa (velocidad de secado) es igual a la velocidad de transferencia de calor.

La velocidad de flujo de masa está dada por:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{CR} = k_y A (Y_s - Y_a) \quad (31)$$

$\frac{\partial M}{\partial t}$ = Velocidad de transferencia de masa (velocidad de secado) [kg s⁻¹]

k_y = Coeficiente de transferencia de masa [kg m⁻² s⁻¹]

A = Área de la superficie disponible para el secado [m²]

Y_s = Contenido de humedad en el aire a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido T_s (humedad en la superficie)

Y_a = Contenido de humedad del aire

$$Y_a = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\text{kg vapor de agua}}{\text{Kg aire seco}} \quad (32)$$

m_v =Peso de masa de vapor de agua [kg vapor de agua]

m_a =Peso de masa de aire seco [kg de aire seco]

La velocidad de transferencia de calor está dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s) \quad (33)$$

Donde

$\frac{\partial Q}{\partial t}$ = Velocidad de transferencia de calor [W]

h = Coeficiente de transferencia de calor [$\text{W m}^{-2} \text{°K}^{-1}$]

T_a = Temperatura de bulbo seco promedio del aire [$^{\circ}\text{C}$]

T_s = Temperatura de bulbo húmedo promedio del aire [$^{\circ}\text{C}$]

λ = Calor latente de vaporización [kJ/kg]= h_{fg}

Debido a que el periodo de velocidad de secado constante la transferencia de calor y la transferencia de masa están en equilibrio, igualamos

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{CR} = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (34)$$

$$k_y A (Y_s - Y_a) = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s) \quad (35)$$

Si $T_a = T_s$ el aire está saturado y entonces no se lleva a cabo el secado.

Cuando el aire fluye paralelo a la superficie de secado es posible usar la siguiente expresión para una temperatura del aire de 45 a 150 $^{\circ}\text{C}$ y una velocidad-masa G (2450 a 29300 kg/h-m^2) o una velocidad de 0.61 a 7.6 m/s

$$G = 3600 \rho_{ah} V_{ah} \quad [\text{Kg/h-m}^2]$$

$$h = 0.0204(G^{0.8}) \quad [\text{W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{K}]$$

Si la corriente de aire fuera constante, el tiempo para alcanzar el contenido de humedad crítica al final del periodo de velocidad de secado constante puede ser determinado por:

$$t = \frac{\lambda}{Ah} \left(\frac{X_i - X_c}{T_a - T_s} \right) \quad (36)$$

Dónde:

X_i =Contenido de humedad inicial del material definido en base seca [kg humedad/kg sólido seco]

X_c =Contenido de humedad crítico [kg humedad/kg sólido seco]. Es una humedad característica, ocurre un cambio en las condiciones de secado en las cuales pasa del secado a velocidad constante a la velocidad de secado decreciente.

Tabla 5: Balance de Energía y masa en la etapa de velocidad de secado constante

Componente	Aire salido en horno (5)
Aire Seco	$m_{a_5,t} = m_{a_4,t}$
Vapor de agua	$m_{v_5,t} = m_{v_4,t} + \frac{\partial Q}{\partial t}$
Aire húmedo	$m_{ah_5,t} = m_{a_5,t} + m_{v_5,t}$
Balance de Energía :	$m_{a_5,t} h_{5,t} = m_{a_4,t} h_{4,t} - Q_{vap} \quad (48)$ $Q_{vap} = DR C_{p_{liq}} (100 - T_s) + DR \lambda$
Velocidad de secado	$DR = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s)$

Etapa C-E. Periodo de Velocidad de Secado Decreciente: En este periodo se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento hidroscópico. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido.

Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación. Durante este periodo la velocidad de secado disminuye lentamente hasta alcanzar cero en el contenido de humedad de equilibrio (es decir, cuando el material llega al equilibrio con el aire de secado). El periodo de velocidad

decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos modelos de secado diferente en dicha zona.

La forma de la curva de secado en este periodo varía en dependencia de las características del material a secar. Existen curvas típicas de cuerpos capilar-porosos con grandes superficies específicas y de pequeñas superficies específicas, así como de cuerpos coloidales.

La primera sección, se conoce como secado de superficie no saturada, empiezan a aparecer zonas secas, la superficie se está secando, ya no está totalmente mojada.

La porción mojada comienza a disminuir hasta que la superficie queda seca en su totalidad. Entonces empieza el segundo periodo de velocidad decreciente, el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie.

El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización, el agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. En algunos casos, el cambio de condiciones de secado de una superficie con humedad parcial a una superficie completamente seca, es tan gradual que no se detecta un punto de inflexión.

Durante el periodo de velocidad de secado decreciente, la velocidad de secado puede ser

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{FR} = k(X_t - X_e) \quad (37)$$

considerado como una función lineal de la humedad disponible:

Donde X_t es el contenido de humedad de la zona de secado de superficie no saturada y la humedad crítica ya ha sido alcanzada.

La constante de secado puede ser determinada aplicando la relación de continuidad

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{CR} = \left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{FR} \quad (38)$$

Por lo que estará dada por la expresión:

$$k = \frac{hA (T_a - T_s)}{\lambda (X_c - X_e)} \quad (39)$$

Y la velocidad de secado decreciente puede ser descrita por la expresión [Ayensu, 2003].

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_{FR} = \frac{hA(T_a - T_s)}{\lambda} \frac{(X_t - X_e)}{(X_c - X_e)} = k' \frac{(X_t - X_e)}{(X_c - X_e)} \quad (40)$$

Donde X_c Contenido de humedad crítica [kg agua/kg sólido seco].

X_e Contenido de humedad en equilibrio [kg agua/kg sólido seco].

Contenido crítico de humedad (X_c), es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.

Contenido de humedad en equilibrio (X_e), es la humedad en equilibrio con el vapor contenido en el aire de secado. Este es el mínimo contenido de humedad en la cual el material puede ser teóricamente ser secado. También es llamado contenido mínimo de humedad higroscópica. X_e Es una función de la humedad y temperatura del aire, así como también la temperatura de la superficie del sólido. Podríamos decir también que, contenido de humedad en equilibrio (X_e), es la humedad limitante a la cual un material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura y humedad del gas.

Integrando la ecuación del contenido de humedad crítica X_c al contenido de humedad promedio de la zona no saturada \bar{X} da el tiempo para completar la primera etapa del periodo de secado de velocidad decreciendo.

$$t_{CE} = \frac{\Delta H(X_c - X_e)}{h_c A(T_p - T_c)} * \ln \left[\frac{X_c - X_e}{X - X_e} \right] \quad (41)$$

Donde los valores de X_e son una función de la humedad y la temperatura del aire y de la temperatura de la superficie del sólido. En una situación ideal de secado a un contenido de humedad cerca a cero ($X_e \sim 0$), cubriendo el primer y el segundo periodo de secado a velocidad decreciente, la ecuación puede ser aproximada por:

$$t_{CE} = \frac{\Delta H(X_c - X_e)}{h_c A(T_p - T_c)} * \ln \left[\frac{X_c}{X} \right] \quad (42)$$

También el contenido de humedad libre (X), es el líquido que se puede separar a una temperatura y humedad dadas. Este valor llega a incluir tanto la humedad ocluida como la no ocluida (retenida).

Tabla 6: Balance de Energía y masa en la primera etapa de velocidad de secado decreciente

Componente	Aire salido en horno (5)
Aire Seco	$m_{a_5,t} = m_{a_4,t}$
Vapor de agua	$m_{v_5,t} = m_{v_4,t} + \frac{\partial Q}{\partial t}$
Aire húmedo	$m_{ah_5,t} = m_{a_5,t} + m_{v_5,t}$
Balance de Energía :	$m_{a_5,t}h_{5,t} = m_{a_4,t}h_{4,t} - Q_{vap}$ $Q_{vap} = R C_{p_{liq}}(100 - T_s) + R \lambda$
Velocidad de secado	$R = \frac{m_w - m_s \left[\left(\frac{m_w}{m_s} - X_e \right) e^{-Kdt} + X_e \right]}{dt}$ $K = \frac{hA}{\lambda} (T_a - T_s) \frac{(X_c - X_e)}{ms}$

4.11 Equilibrio durante el proceso secado.

Si el material a secar se pone en contacto con el aire húmedo entonces en principio son posibles dos procedimientos:

1. Secado (desorción de la humedad del material) siendo la presión parcial del vapor sobre la superficie del material (P_m) superior a su presión parcial en el aire (P_v), es decir $P_m > P_v$.
2. Humectación (sorción de la humedad del material) para $P_m < P_v$

En el proceso de secado la magnitud (P_m) disminuye y se aproxima a su límite $P_m = P_v$. En este caso comienza el estado de equilibrio dinámico, al que corresponde la humedad límite del material, llamada también humedad de equilibrio X_{eq} . La humedad de equilibrio depende de la presión parcial del vapor sobre el material P_v , o de la magnitud de la humedad relativa del aire que es proporcional a dicha presión. Un modelo de difusión permitirá predecir la

distribución de humedad dentro del material, por lo tanto, permitirá determinar el contenido de humedad local.

4.12 Recirculación del aire

Tabla 7: Recirculación y Salida de Aire

Componente	Recirculación (6)	Salida de aire (7)
Aire seco	$m_{a_6,t} = Z * m_{a_5,t}$	$m_{a_7,t} = m_{a_5,t} + m_{a_6,t}$
Vapor de agua	$m_{v_6,t} = Z * m_{v_5,t}$	$m_{v_7,t} = m_{v_5,t} + m_{v_6,t}$
Aire húmedo	$m_{ah_6,t} = Z * m_{ah_5,t}$	$m_{ah_7,t} = m_{ah_5,t} + m_{ah_6,t}$
<i>Balance de energía:</i> $m_{a_5,t}h_{5,t} = m_{a_6,t}h_{6,t} + m_{a_7,t}h_{7,t}$		(43)

La temperatura de la corriente de salida y de recirculación es igual a la temperatura de la corriente de salida del horno

$$T_5 = T_6 = T_7$$

4.12 Condiciones de simulación

En los procesos de secado, los datos se obtienen generalmente como el cambio del peso del producto sobre el tiempo. Sin embargo, los datos de secar a veces pueden ser expresados en términos de velocidad de secado.

Al fin de obtener algunos resultados de tiempo total requerido para la deshidratación, la temperatura del aire después del calentamiento, la humedad del aire, velocidad del aire hacia el chile, la humedad del producto, que se va a utilizar para la deshidratación de jalapeño chile, tendrá que investigar las características de aire en general y los parámetros y características del producto. Para este caso, obtendrán el método exacto de la eliminación de contenidos de humedad contenidas en el producto. Los chiles tienen el 90% del total del agua y la cantidad de los contenidos de humedad que deben eliminarse es el 80% de la humedad total que contenía.

Quiere decir que: -

- Chile fresco que va a estar en el horno para secar es. - 4375 kg.
- Agua inicial en el chile total es 90% (de 4375kg) = $\frac{90}{100} * 4375\text{kg} = 3937.5\text{kg}$ (agua total en el producto).

- 100% (de peso total) – 90% (de peso total del agua en el producto) = 10% (de peso total en parte seco Del producto.)
- 4375kg - 3937.5kg = 437.5kg (kg total de chile seco sin agua).

En deshidratación de chile chipotle, lo que va a cambiar es cantidad de humedad (agua) dentro del producto, pero cantidades de chiles seco (los 437.5kg) no van a cambiar. Por lo tanto, dentro de control volumen; 437.5kg en inicial proceso de secador hasta último proceso va a estar constante.

Entonces $V_c = 437.5\text{kg}$

- A través los chipotleros de Chihuahua en Camargo, tomaron el rango de que en cada 7Kg de Chile fresco, aproximadamente puede tener 1 kg de chile seco, entonces

$$\frac{7\text{kg de chile fresco}}{1\text{ kg de chile seco}} = \frac{4375\text{ kg de chile fresco}}{(X)\text{ kg de chile seco}}$$

Entonces,

$(X) = 625\text{ kg de chile seco con agua (Producto final)}$

Significa, en 4375kg de Chile fresco final tendríamos tener cantidad de 625 kg de chile seco.

Cantidad de agua en el producto después de secar

$$\left(\begin{array}{c} \text{Kg de agua en} \\ \text{(Producto final)} \end{array} \right) = \left(\left\{ \begin{array}{c} \text{kg de chile seco con agua} \\ \text{(Producto final)} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{(kg de chile seco sin agua)} \\ \text{(producto)} \end{array} \right\} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Kg de agua en} \\ \text{(Producto final)} \end{array} \right) = 625\text{ kg} - 437.5\text{ kg} = 187.5\text{ kg}$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Kg de agua en} \\ \text{(Producto final)} \end{array} \right) = 187.5\text{kg en producto final después de secar. El producto va a tener}$$

esa cantidad de humedad

Para obtener 10% de agua en la salida;

V_c Representaría, 80% del peso total del agua a la salida,

Chile seco, $(437.5\text{ kg})\text{ seco} = 90\%\text{ seco}$

$(X\text{ kg})\text{ agua} = 10\%\text{ agua}$

$$X = \frac{10\% * 437.5\text{kg}}{90\%} = 48.611\text{ kg de agua.}$$

Significa, cuando terminar a secar chile va a tener 10% de agua, por lo tanto 48.61 kg es 10 % de agua total en el producto después de secar, quiere decir que, 187.5 kg es 10% de agua total en producto final.

$$\text{Peso total de agua con chile} = 48.611 + 437.5 = 486.11\text{kg}$$

Contenido de humedad en base seca (M)

$$M = \frac{W_t - V_c}{V_c}$$

Contenido de humedad en base seca (M) en la entrada

$$M = \frac{4375 - 437.5}{437.5} = \frac{3937.5}{437.5} = \frac{90\%}{10\%} = \frac{90\% \text{ (kg de agua total en el producto)}}{10\% \text{ (kg de producto seco sin agua)}} = 9$$

Contenido de humedad en base seco (M) en la salida

$$M = \frac{546.875 - 437.5}{437.5} = \frac{109.375}{437.5} = \frac{20\%}{80\%}$$

$$= \frac{20\% \text{ (kg de agua total en el producto despues de secar)}}{80\% \text{ (kg del agua sale dentro del producto despues de secar)}} = 0.25$$

Donde,

M, Contenido de humedad en base seco (*moisture content in drying basis*)

W_t , Peso total del producto en (kg), V_c = Peso total del producto (kg),

La cinética de secado se determinará y los datos se manejan de una forma matemática para evaluar las mejores ecuaciones racor que describen las curvas de secado. Para lograr esto, las condiciones de secado tendrían que ser controlado muy cuidadosamente para asegurar velocidad constante, el contenido de humedad constante, y la temperatura constante del flujo del aire.

CAPITULO V

5 RESULTADOS

La validación del modelo se realizó durante el desarrollo del proyecto mediante la comparación de los resultados entregados por la simulación y los resultados experimentales obtenidos en un prototipo de laboratorio.

Para reproducir de manera experimental las de curvas de secado anteriormente descritas, las condiciones de secado tendrían que ser controladas muy cuidadosamente para asegurar velocidad constante, humedad relativa del aire constante, y la temperatura constante del flujo del aire.

En las pruebas que se llevaron a cabo, las condiciones iniciales del aire fresco dependen de las condiciones climáticas. Sin embargo, se hicieron esfuerzos por mantener la temperatura a la entrada del horno, aproximadamente constante (77 °C). Así como una velocidad del aire de entrada de 1 m/s.

Pruebas experimentales de secado

Se hicieron 12 pruebas de secado en total, donde se probaron diferentes condiciones de secado como cambio de la temperatura del aire y cantidad de chile. Pero hay algunos problemas aparecieron en las pruebas 1 hasta 7 y también prueba número 9 y 10. Algunos de los problemas que aparecieron fugas de aire que provocaban una disminución significativa de la temperatura del aire de secado, así que no había buen control de la temperatura. En algunas de las pruebas se quemaron los chiles en el secador, debido a problemas con la temperatura de secado establecida inicialmente (80 °C) y con el sistema de control. También había un problema con los intervalos de medición del tiempo de secado con respecto al porcentaje de pesos perdido con el chile y eso apareció especialmente las pausas hechas durante la noche.

Las pruebas número 8 y número 12 son las pruebas que no presentaron los problemas anteriores. Los resultados experimentales indican que el tiempo de secado fue 48 horas. Ese tiempo incluye los horarios diarios y los horarios de la noche. En este sentido, las otras pruebas no se sirven para comparar con los resultados del modelo Matlab.

PRUEBA # 12

A continuación, se presenta la discusión de los resultados de prueba 12. La velocidad del aire de entrada se consideró constante, igual a 1 m / s.

El aire al entrar al sistema lleva diferentes valores de humedad y temperatura, dependiendo obviamente de las condiciones climáticas, el sistema está diseñado para elevar la temperatura del aire a 77 °C. La consecuencia física de elevar la temperatura del aire es disminuir su humedad relativa (ϕ), en este momento al aire le corresponde un cierto valor de humedad específica (w_4); este aire caliente y seco entra a la cámara de secado y mediante un proceso de saturación adiabática remueve humedad al producto; en este caso, el chile chipotle. El aire sale de la cámara de secado con menor temperatura y con una humedad específica (w_5) mayor.

Al multiplicar la diferencia de humedad específica ($\Delta\omega$) con el flujo másico de aire (\dot{m}) que entra a la cámara de secado, podemos determinar la cantidad de humedad que podemos eliminar del chile por hora.

Curvas de secado

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. La curva de secado representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, después sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y por último cuando el agua del interior del sólido se evapora. Esta curva indica que la velocidad de secado está sujeta a variar en función del tiempo o el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación gráfica de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, o como velocidad de secado en función del tiempo.

Velocidad de secado en función del tiempo

La gráfica 17 muestra la velocidad de secado en función del tiempo, comparando los resultados de la simulación del modelo (curva de color rojo) con los resultados experimentales en la prueba realizada en el prototipo (curva color azul). Los resultados de simulación muestran una tendencia similar que los experimentales. Sin embargo, se observa un pico en los resultados experimentales (cerca de las 25h), esto se debió a que la prueba no se llevó a cabo de manera continua, y la muestra se dejó por un largo período de tiempo a las

condiciones ambientales. Durante este período se siguió llevando el proceso de secado, aunque de manera más lenta (por no estar encendido el horno). Sin embargo, el período de tiempo se empezó a contabilizar cuando se encendió de nuevo el horno.

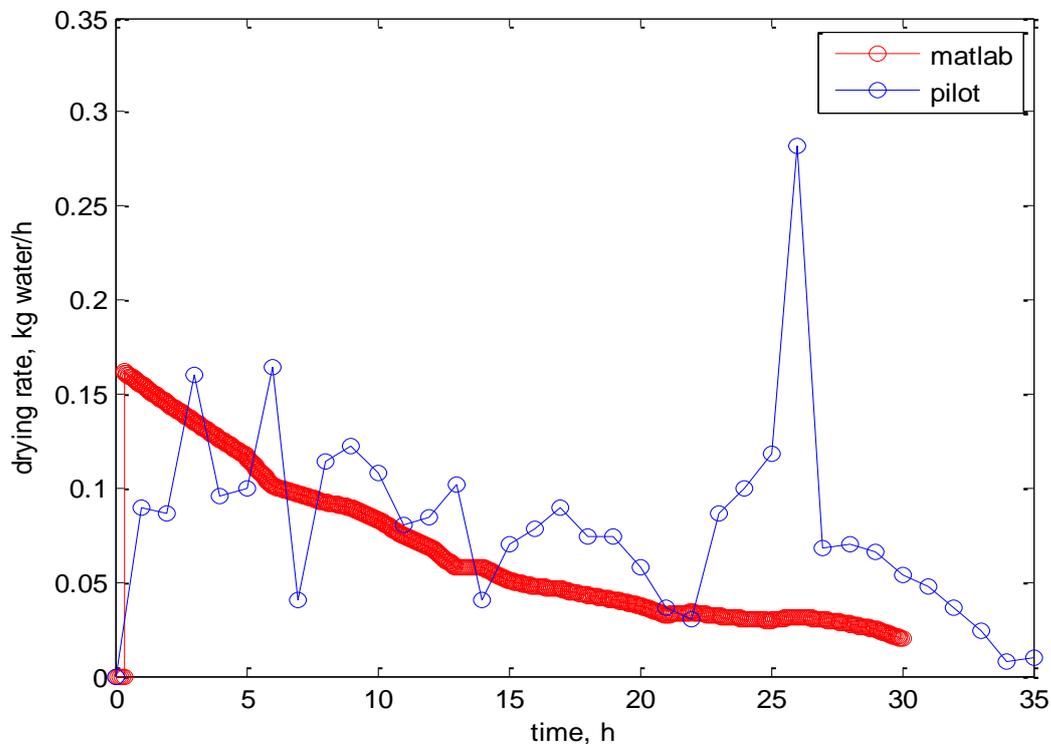


Figura 17: Velocidad de secado en función del tiempo

En la figura 18 se observa que el contenido de humedad del aire está incrementando cuando el producto empieza a evaporarse. El contenido de humedad que contiene en un momento particular, es en este caso, un tiempo especial donde el aire comienza a ganar masa y el producto está perdiendo su masa. Por lo tanto, las curvas del modelo, indican que, las curvas w_1 con color rojo tienen el contenido de humedad más bajo en comparación con las otras curvas (puntos), y esto se debe a que el punto uno corresponde al punto donde el aire fresco entra al horno secador antes de estar contaminado con la humedad del producto. Por lo tanto, la simulación indica que, la humedad en el aire de entrada es menor.

Además, comparando el punto (4) con el punto (5), (a la entrada y salida del horno, respectivamente), la simulación indica, como era esperado, que hay una diferencia de contenido de humedades. Por lógica, en el punto de salida, el aire lleva a una cantidad más elevada de humedad, debido a que el aire que entra en el secador ganaría el agua que fue evaporada del producto.

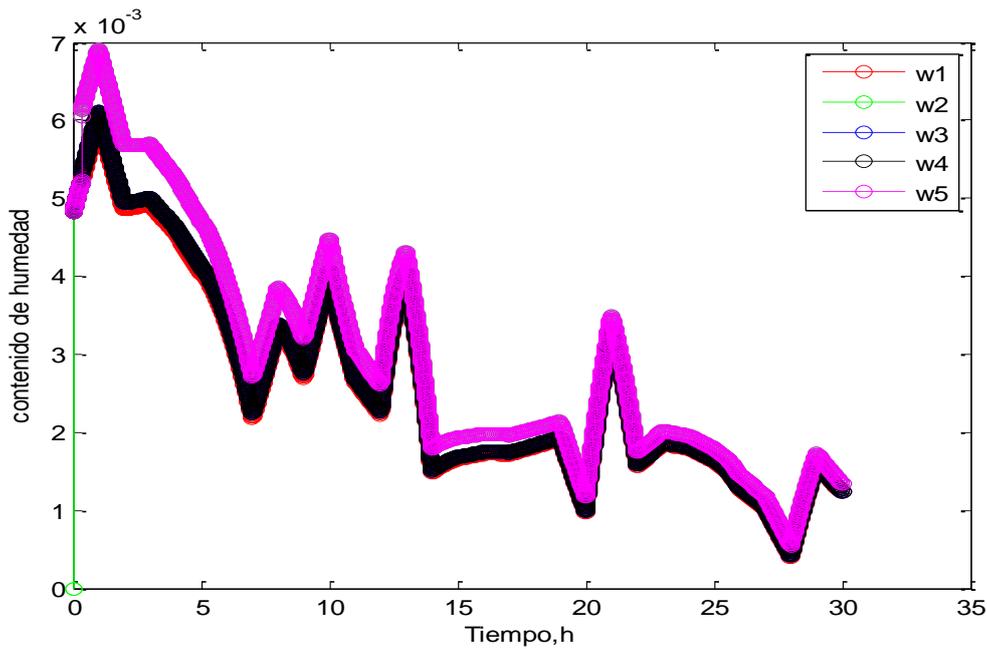


Figura 18: Gráfico de contenido de humedad en base seca (kg agua/kg de sólido seco) en función del tiempo (horas)

Gráfico de peso (kg) en función del tiempo (horas)

La figura 19 indica como el peso del producto disminuye con respecto al tiempo. La curva de color rojo, representa los resultados del modelo. La curva de color azul muestra los resultados experimentales. Las dos curvas muestran un buen acuerdo hasta cerca de las 25 horas. La misma razón explicada en el gráfico de velocidad de secado en función de tiempo afecta la forma de la curva peso en función de tiempo de los resultados experimentales.

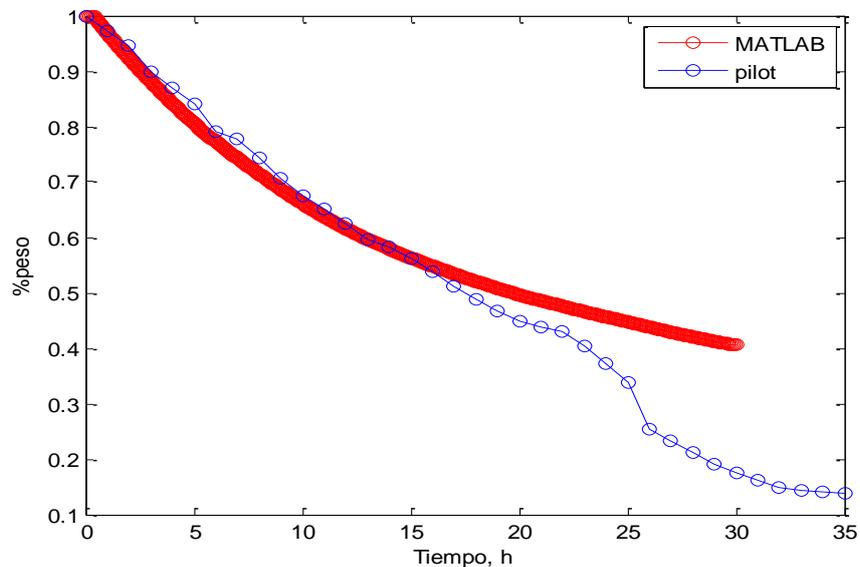


Figura 19: Gráfico de peso, (kg) en función del tiempo (horas)

Gráfico de humedad relativa en función del tiempo

La figura 20 indica la humedad relativa ϕ es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido en cierta masa de aire y el que éste contendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura.

La humedad relativa también es la relación entre la presión de vapor y la presión de saturación a la misma temperatura [Gelys, Guanipa, 2010].

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}}$$

En este gráfico se indican las curvas de humedad relativa en cada punto del secador, con un color diferente. La curva rh1 corresponde a la humedad relativa en el aire fresco (medida a temperatura ambiente), las otras tres curvas corresponden a los resultados del modelo Matlab en esos puntos.

Humedad relativa punto 1 (rh₁): La curva de color amarillo indica la humedad relativa en el punto número uno (1), que corresponde a la entrada de aire fresco (Ver diagrama del sistema del horno, Figura 14). Es decir, estos datos corresponden a los datos de humedad relativa del aire medidos a temperatura ambiente.

Humedad relativa punto 3 (rh₃): El tercer punto (3), es el resultado de una mezcla de adiabática de aires: aire fresco (punto número uno) y recirculación del aire (punto dos). La curva de humedad relativa en este punto se indicó con el color rojo. Se observa que la curva de humedad relativa en el punto de mezcla es menor a la del aire fresco (1). Esto es debido a que el aire recirculado tiene una temperatura más alta, pero una humedad relativa menor (comparada con el aire fresco), por lo tanto, afecta la humedad relativa en ese punto particular.

Humedad relativa punto 4 (rh₄): La mezcla adiabática de las dos corrientes (aire fresco + recirculación) es alimentada a un calentador de aire donde pasará de la temperatura T_3 hasta la temperatura $T_4 = 77^\circ\text{C}$, que es la temperatura deseada para el suministro de aire al horno. En esta etapa, el aire tendrá una disminución de la humedad relativa con el aumento en su temperatura.

Humedad relativa punto 5 (rh₅): En el punto número 5 corresponde al punto de salida del aire del horno secador. La curva de humedad relativa estimada por el modelo se indica en la

gráfica con el color verde. El aire de este punto ha sido contaminado con el contenido de humedad del chile. Por lo tanto, se observa una disminución de la temperatura del aire en la salida y un aumento en la humedad relativa (en comparación con el punto 4, a la entrada del horno).

La humedad relativa del fluido (aire) depende de la temperatura del fluido. Cuando aumenta la humedad relativa de un fluido se causa disminución de la temperatura y viceversa.

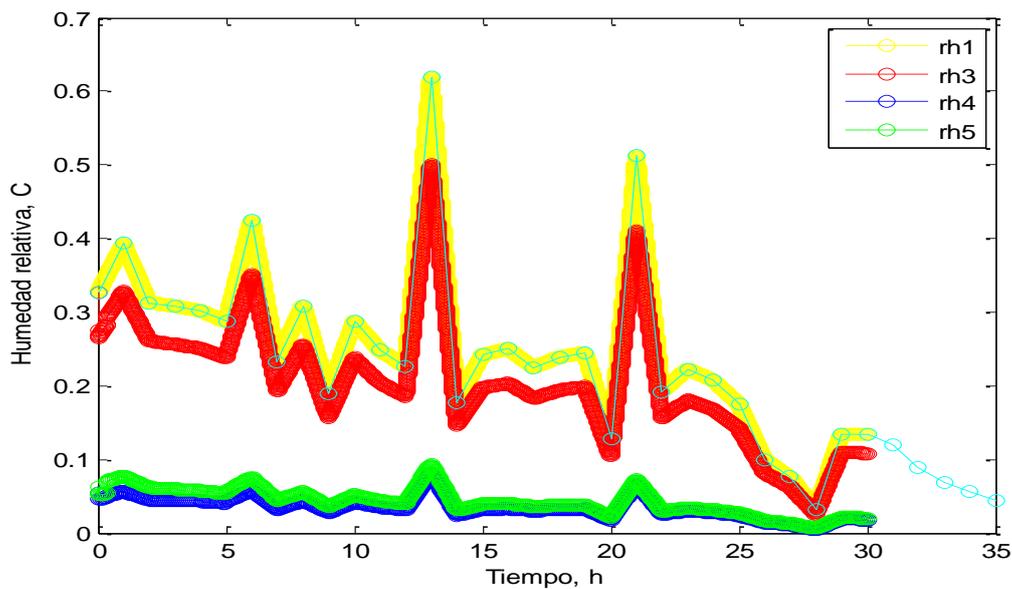


Figura 20: Gráfico de humedad relativa en función del tiempo

PRUEBA # 8

Los resultados de simulación muestran una tendencia similar que los experimentales.

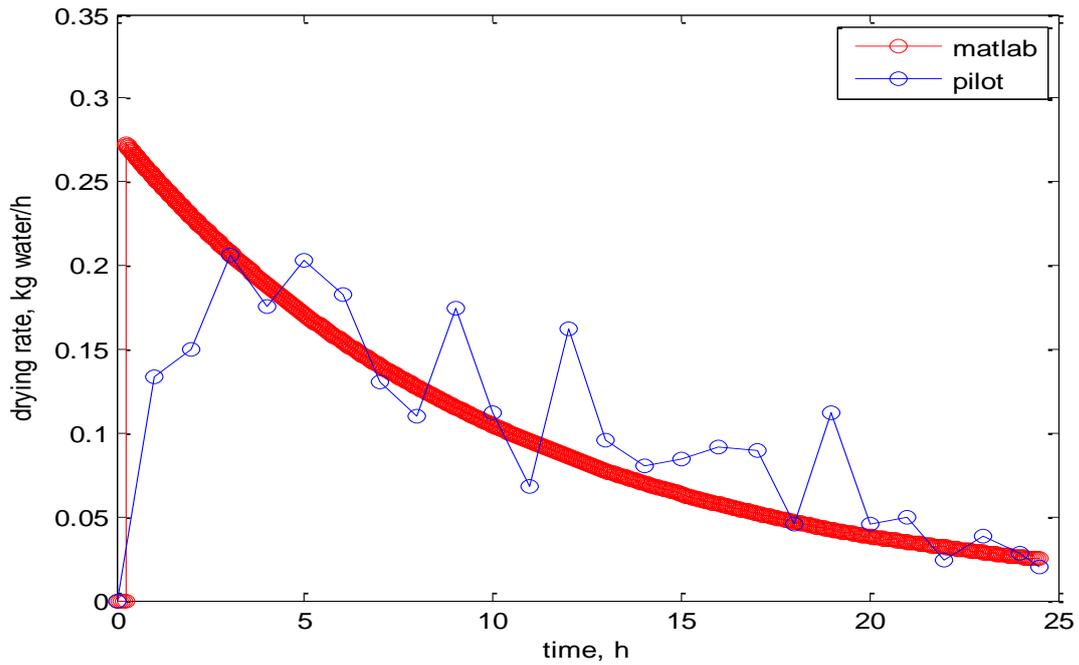


Figura 16: Velocidad de secado en función del tiempo

Se consideró una recirculación del 10% del aire de salida. A medida que el aire se va saturando, la curva de contenido de humedad en la salida del horno (w_5 , color magenta) y la curva de contenido de humedad en la entrada del horno (w_4 , color negro) se van aproximando, haciendo más difícil el proceso de secado (la velocidad de secado va decreciendo ver gráfico 23 de velocidad de secado en función del tiempo).

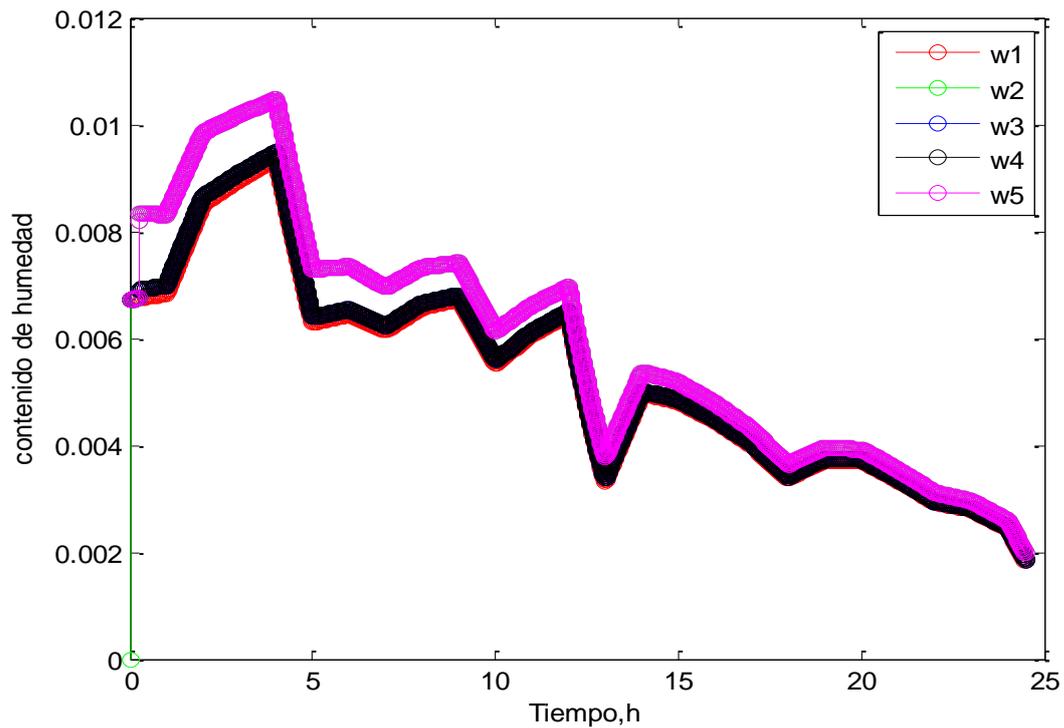


Figura 17: Gráfico de contenido de humedad en base seca (kg agua/kg de sólido seco) en función del tiempo (horas)

El gráfico 23 muestra cómo el peso del producto disminuye con respecto al tiempo. La curva de color rojo, representa los resultados del modelo. La curva de color azul muestra los resultados experimentales. En este caso, según los datos experimentales se inició la prueba con un peso inicial de 3.184 kg y en un período de 24 horas de secado se tenía un peso de 0.58 kg.

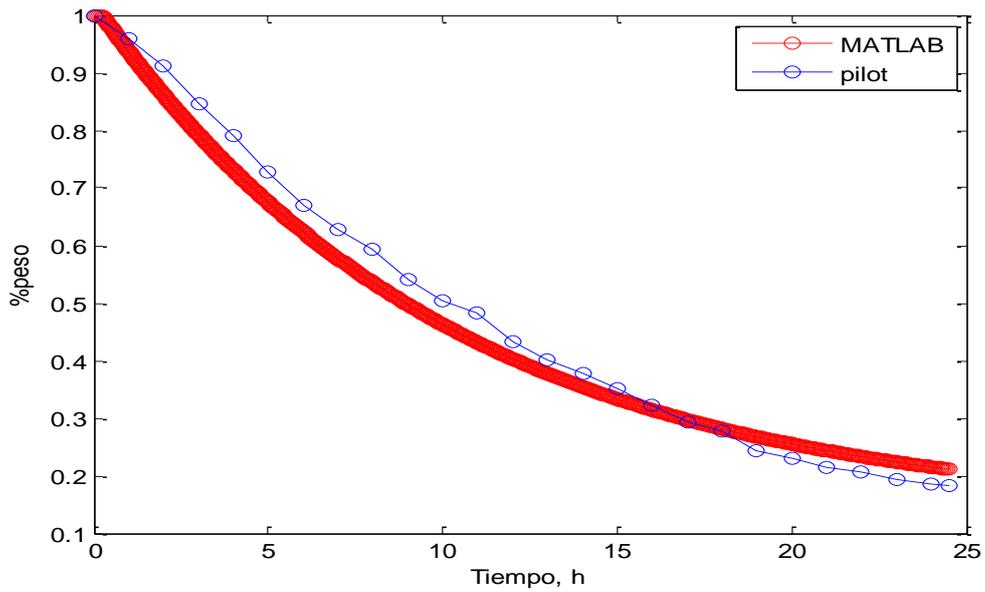


Figura 18: Gráfico de peso (kg) en función del tiempo (horas)

En el gráfico 24, se ve claramente como la humedad relativa en el aire disminuye desde su condición inicial (rh_1) al mezclarse con una corriente con mayor temperatura en el punto 3 (rh_3) y disminuye en mayor cantidad con el uso del calentador (rh_4), y finalmente a la salida del horno la humedad relativa (rh_5) tiene un ligero aumento.

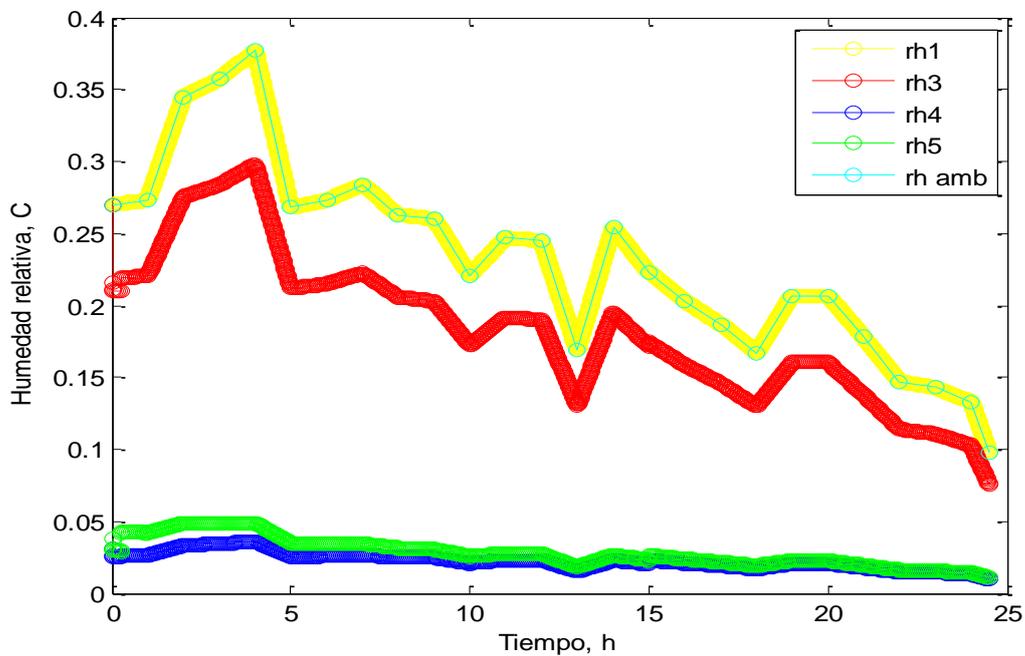


Figura 19: Gráfico de humedad relativa en función del tiempo

En la gráfica 25, la curva de color negro (T_i °C) representa la temperatura del chile, la cual corresponderá a la temperatura de bulbo húmedo del aire que lo rodea.

La curva de color amarillo (T_1 °C) representa la temperatura del aire fresco (temperatura ambiente).

La temperatura a la salida del horno (T_5 °C) calculada por el modelo, está en muy buen acuerdo con la temperatura del sensor (curva de color azul) que midió esta temperatura en la corriente de salida. En general, la temperatura a la salida del horno decrece un poco con respecto a la temperatura de entrada del horno (T_4 °C).

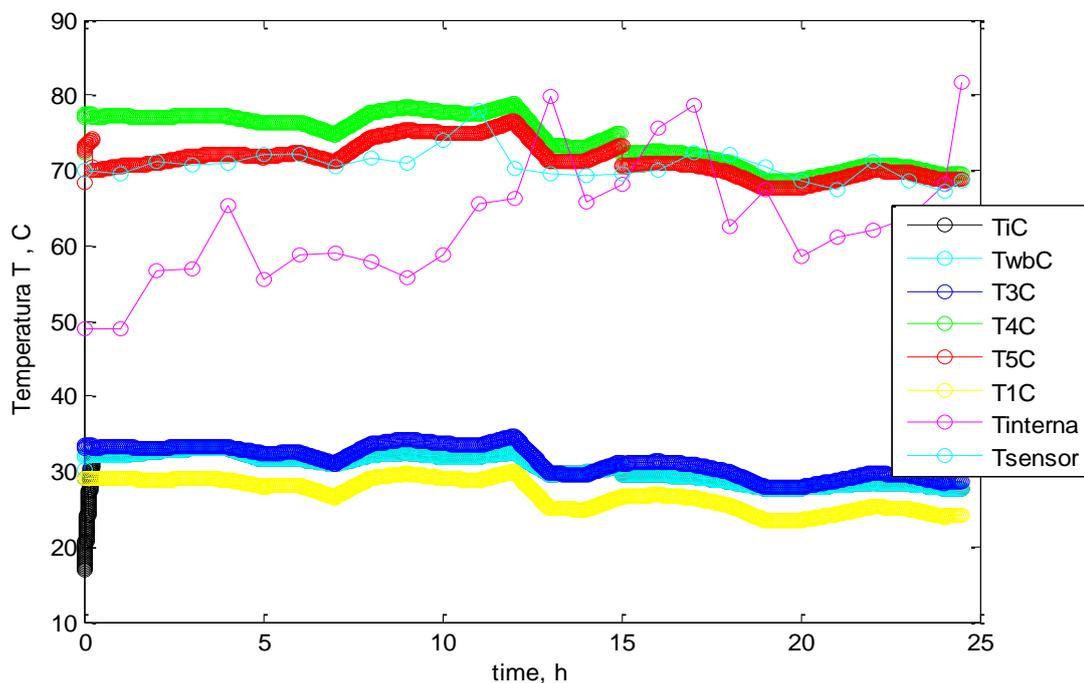


Figura 20: Gráfico de la temperatura en función del tiempo

5.1 Dimensionamiento del horno

Si consideramos las dimensiones del horno como sigue:

Largo=12 m

Ancho= 1.4 m

Altura = 1.6 m

Donde las bandejas de tamaño 1.4m x 1.4 m x 0.12 m están acomodadas en 8 columnas de 6 bandejas cada una.

Si consideramos que cada bandeja contiene dos capas de chile, siendo el espesor promedio de cada chile 0.03 m. Entonces el espesor ocupado en cada bandeja es de 0.06 m. Y la altura de aire que estará sobre cada bandeja será de 0.17m.

Observamos que no es posible obtener la misma curva de secado (% en peso vs tiempo).

La mejor aproximación obtenida fue considerando un área de entrada de aire de 13.33 m², con un flujo volumétrico de 4500 m³/h.

Bajo estas condiciones, las temperaturas en todo el sistema siguieron las siguientes curvas, en las que se observa que la diferencia entre la temperatura de entrada (T_4) y la temperatura de salida (T_5) es muy significativa. Lo que ocasiona de manera general, que la temperatura dentro del horno permanezca a una temperatura más baja que la esperada (77 °C).

Debido a este elevado cambio en la temperatura, no es posible alcanzar la misma curva de secado que la obtenida experimentalmente, sino que la velocidad de secado será más lenta.

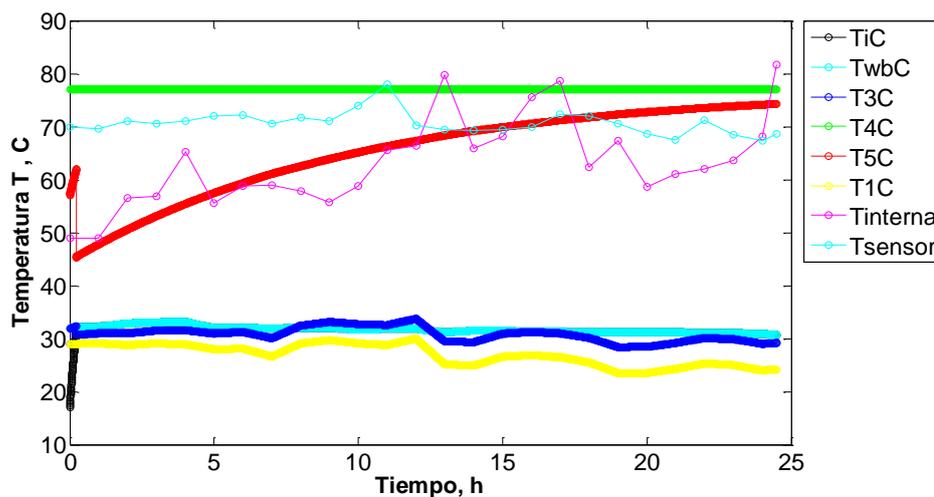


Figura 21: Gráfico de la temperatura en función del tiempo

Para la modelación, se consideró un peso inicial de 2218.9 kg y a través del modelo se estimó el peso final de 404.2 kg. Esa cantidad del chile dentro del horno fueron tenerlo a través el método de escalar la cantidad del chile que está disponible en el prototipo y cambiaron en forma de escalar en horno piloto.

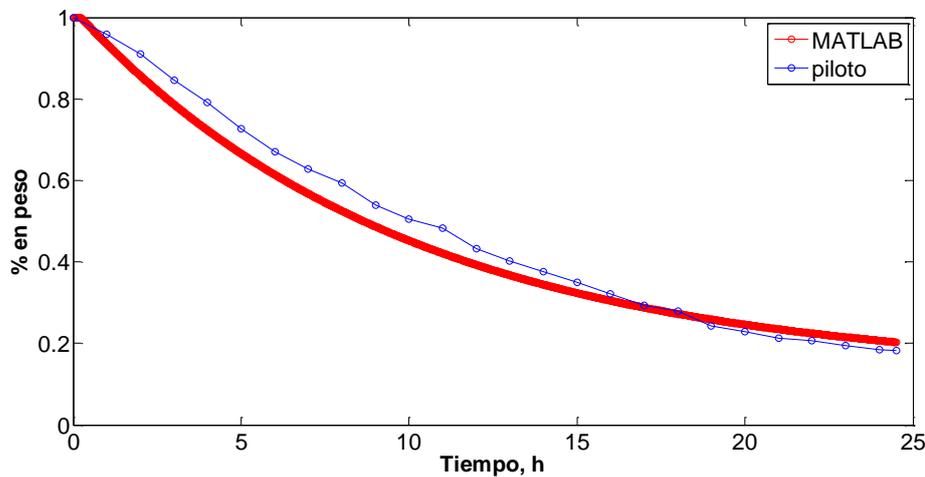


Figura 22: Grafico del % peso vs Tiempo

La figura 28 indica la velocidad de secado en la simulación, la curva de los resultados del modelo está de acuerdo con la velocidad requerida. La gráfica indica que la velocidad está decreciendo con respecto al tiempo.

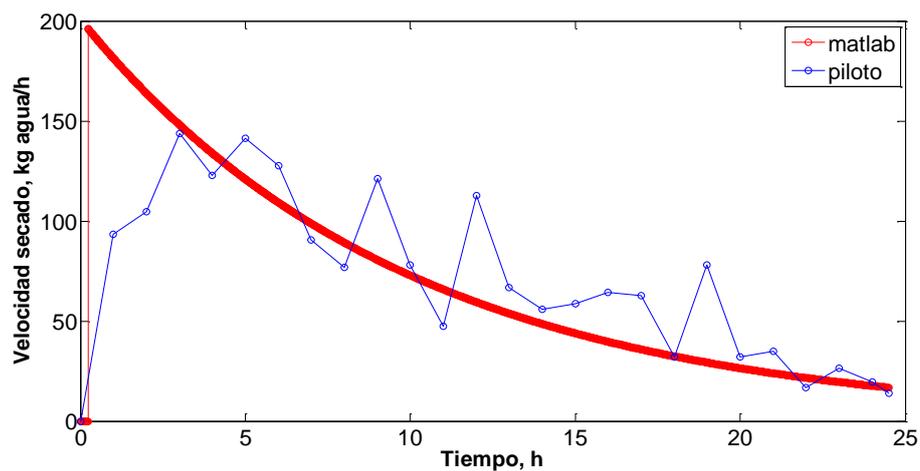


Figura 23: Grafico del Velocidad de secado (kg de agua/h) vs Tiempo

Bajo estas condiciones el contenido de humedad del aire aún no ha alcanzado las condiciones saturación (w_s) y la humedad relativa del aire de salida del horno (rh_5) observamos que al inicio del período de secado como era de esperar tiene un aumento significativo, sin embargo, a medida que pasa el tiempo va disminuyendo (figura 29).

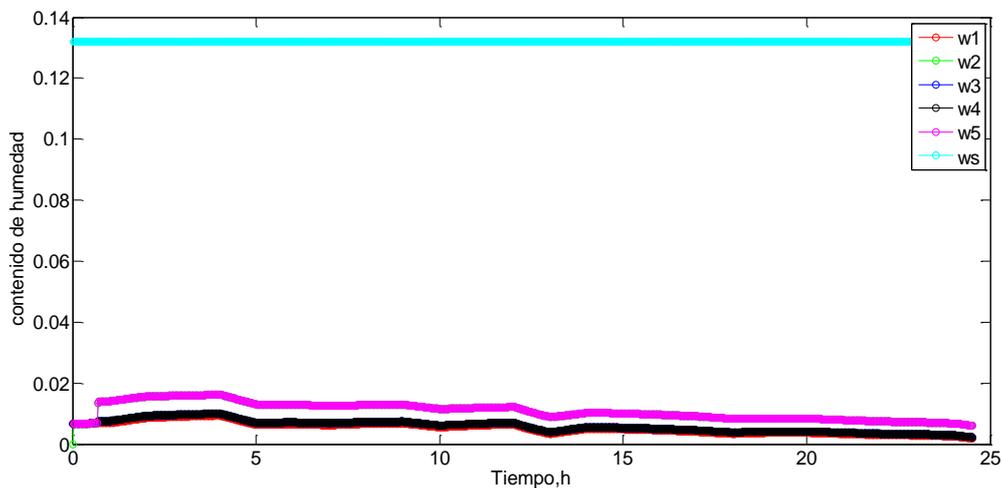


Figura 24: Gráfico de contenido de humedad en base seca (kg agua/kg de sólido seco) en función del tiempo (horas)

La figura 30, indica que la humedad relativa en cada punto del sistema del horno (notación descrita en figura 14) está disminuyendo en los puntos en los que la temperatura es alta y la humedad relativa está aumentando cuando la temperatura es baja.

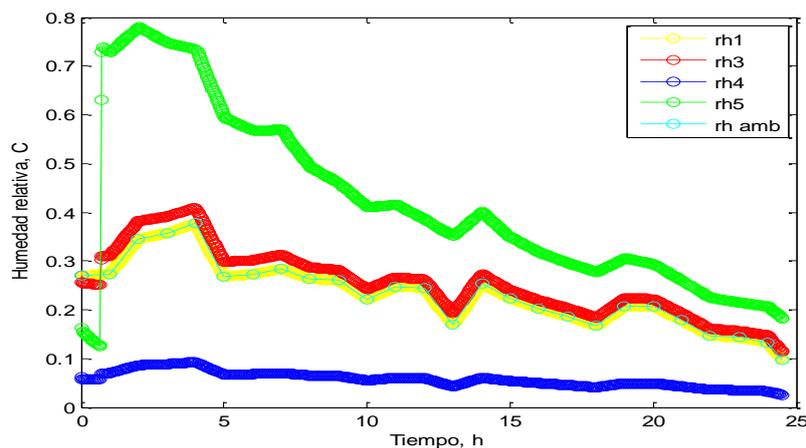


Figura 25: humedad relativa en función del tiempo

La gráfica 31, indica la humedad libre (agua) que excede al contenido de humedad de equilibrio del sólido. Esta humedad es la que se remueve por vaporización. Puede dividirse

en: agua no ligada y agua ligada. Con eso grafica se ve la humedad que puede evaporar hacia el aire. Está en un rango de los 60% hasta los 10% ya que hasta ese rango el proceso va a terminar a secar y el producto va a quedar con 10% de humedad así que es la humedad requerida en el producto final.

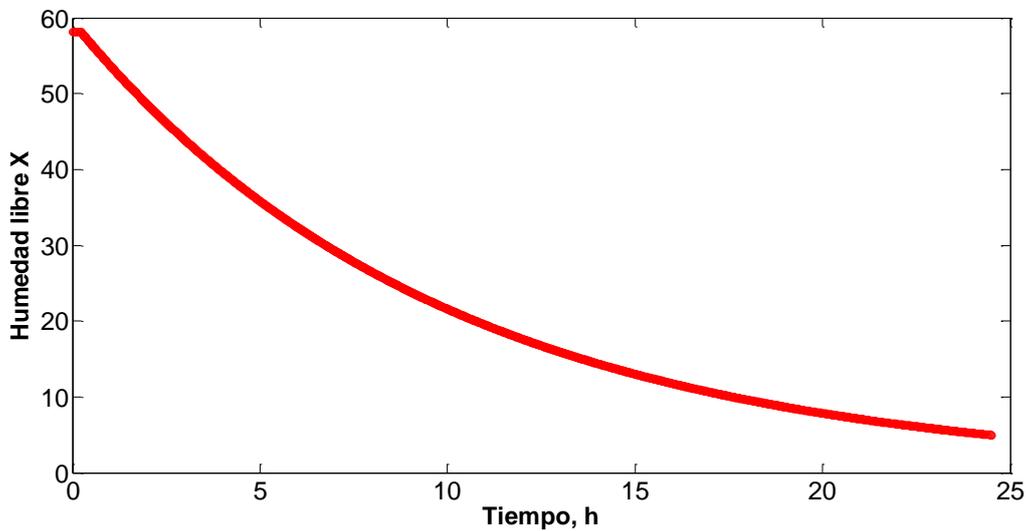


Figura 26: Humedad de libre en función del tiempo

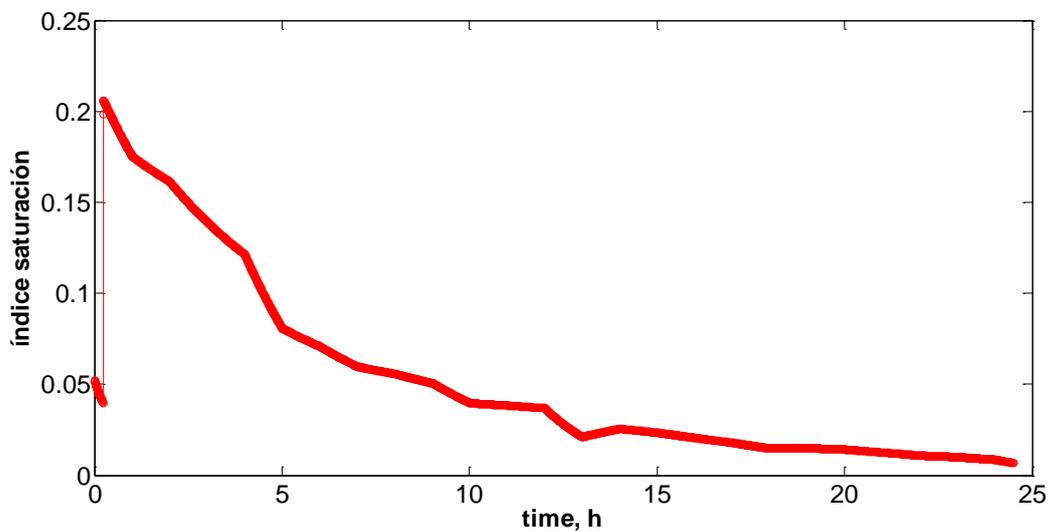


Figura 27: Índice de saturación en función del tiempo

La grafica 33; considerando una eficiencia del calentador del aire de 70%, la energía que se requiere suministrar para secar 2218.9 kg de chile en 24.5 h, varía en función del tiempo entre 540.76 y 617.77 kJ/s, con un promedio de 582.83 kJ/s (407.98 kJ/s que serán utilizados para el calentamiento del aire).

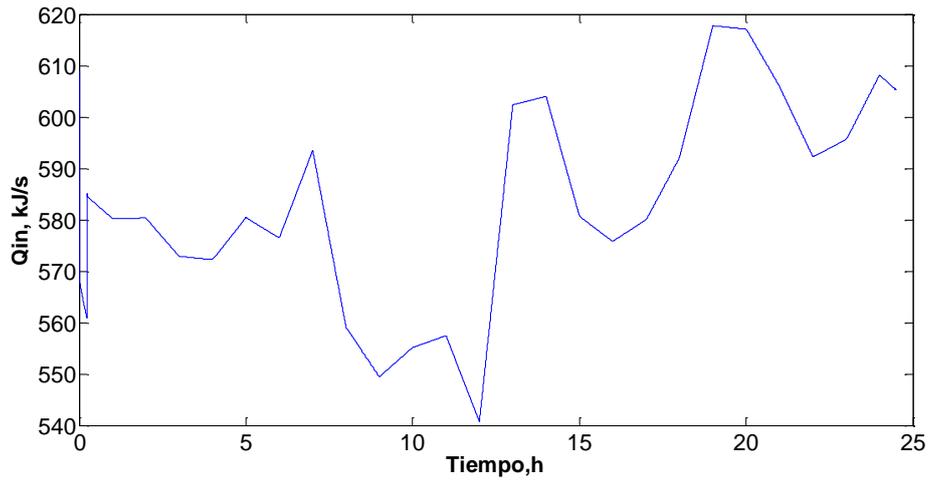


Figura 28: Cantidad de energía en función del tiempo

la prueba de las 8 columnas, los errores sacaron a través la diferencia entre el peso de los datos experimentales con el peso del cálculo del modelo dividido entre datos experimentales. Por ese cálculo error fue entre [-11.61, 12.88]

$$\%error = \frac{\% \text{ en peso experimental} - \% \text{ en peso calculado modelo}}{\% \text{ en peso experimental}} \times 100$$

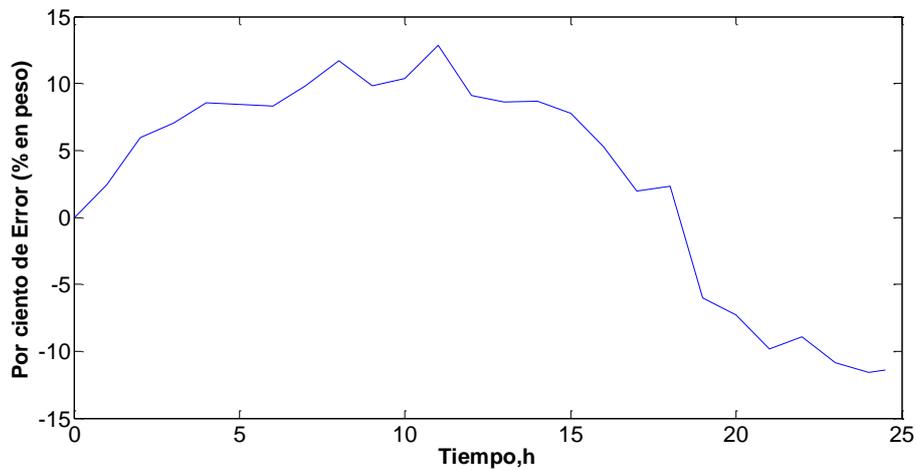


Figura 29: Porcentaje de error en peso (kg) en función del tiempo

Arreglo en 1 columna.

En cambio, si consideramos las dimensiones del horno conteniendo una sola columna con 6 bandejas:

Largo=1.4 m

Ancho= 1.4 m

Altura = 1.6 m

En este caso, las curvas de secado, considerando un área de entrada de 1.66 m^2 , con un flujo volumétrico de $4500 \text{ m}^3/\text{h}$, muestran un ligero aumento en la velocidad de secado con respecto a los datos experimentales.

Las siguientes gráficas 35; muestran el resultado de la simulación considerando una longitud de 1.4m del horno, un área de entrada de aire de 1.66 m^2 , con un flujo volumétrico de $4500 \text{ m}^3/\text{h}$.

En estas curvas muestran un mejor acuerdo con la curva de velocidad de secado (kg de agua vs tiempo) a la obtenida experimentalmente.

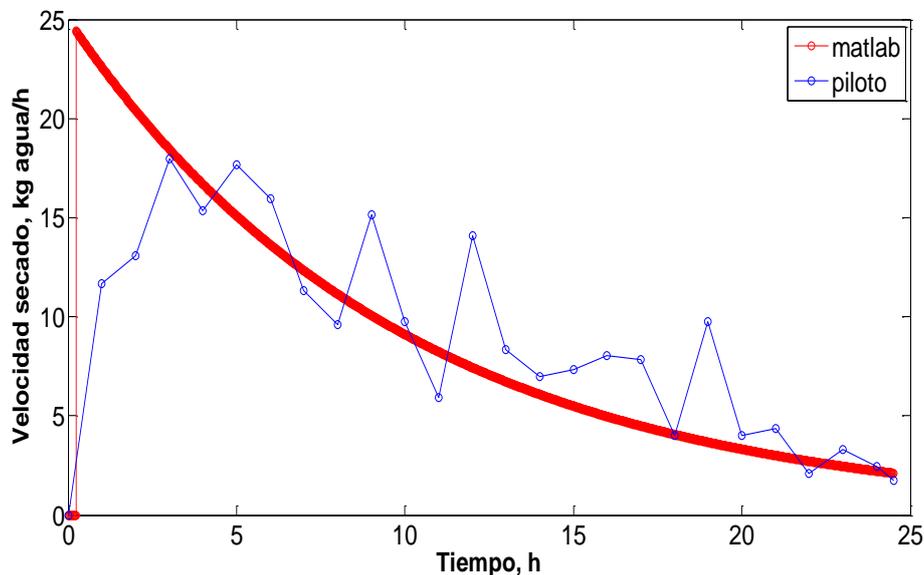


Figura 30: Velocidad de secado (kg-agua/h) en función del tiempo

La grafica 36; es simulación de la % del peso con el tiempo. A través el modelo, escalaron el horno piloto con tamaño del prototipo y vieron que casi cada columna llevo Chile inicial en peso de 277.36 kg y cuando secaron esa cantidad se quedó con el peso final de 50.52 kg.

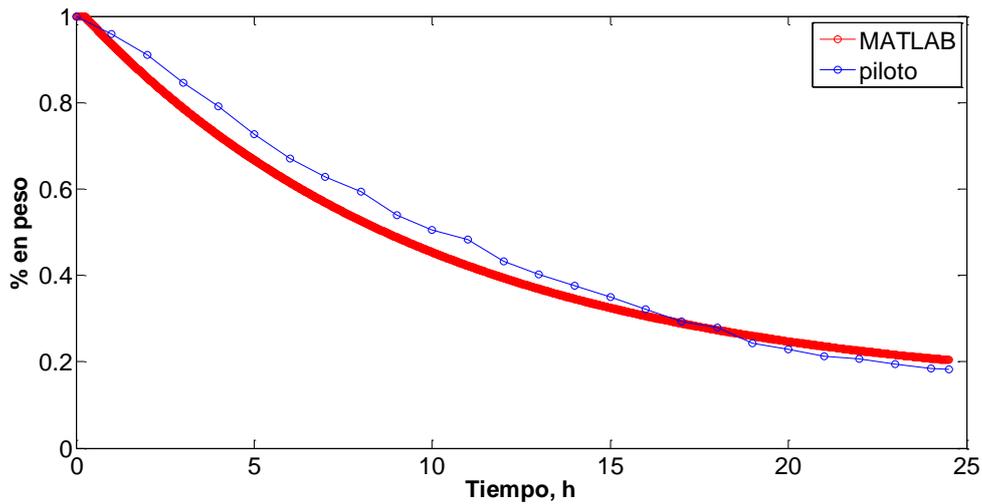


Figura 31: % del peso en función del tiempo

También se calculó un porcentaje de error (o diferencia entre los datos experimentales y los calculados por el modelo) dividido con datos experimentales.

$$\text{Porcentaje error} = \frac{\text{peso experimental} - \text{peso calculado modelo}}{\text{peso experimental}} \times 100$$

El rango del error con la simulación fue entre -12.02, y 12.60.

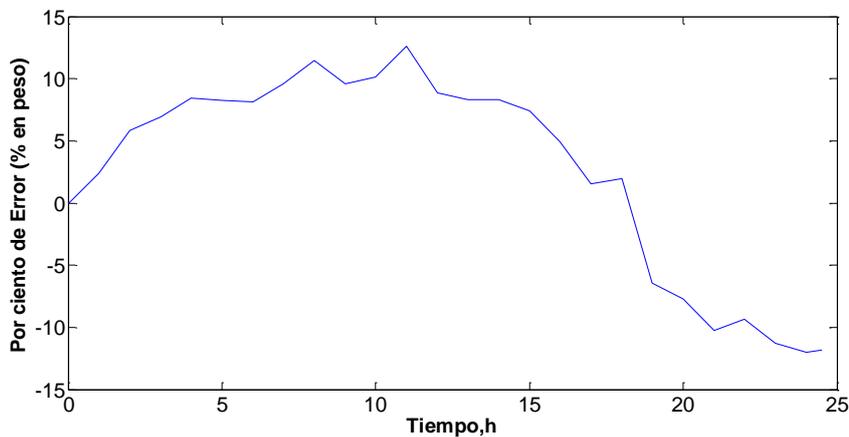


Figura 32. Por ciento del error en función del tiempo

Además, observaron la disminución en la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del horno al haber una disminución en la longitud del horno (de 12 m a 1.4m).

En la gráfica 38; vieron que la temperatura de la salida del calentador (*punto 4*) con color verde esta aproximadamente 77 °C y fue casi contante hasta las 24 horas. sea la temperatura

del aire que está entrando dentro del horno. Y es más alta que las de otros puntos. Y también la temperatura con color rojo con (*punto 5*) es la que está saliendo en el horno y vieron que fue aumentando hasta lograr igualdad en los último horas, es significativamente en los casos de secado, que en los último tiempos, los chiles dentro del horno van a quedar con muy poquito cantidad de humedad así que el aire estuvo entrando y salió por afuera del horno sin nada de humedad del aire pero vieron que con los primeros tiempo, la temperatura de salida del horno fue muy bajo con mucho humedad y eso había porque fue el tiempo de secado. La temperatura a la entrada del horno es la deseada y la temperatura de salida del horno T_5 °C tiene un muy buen acuerdo con los datos experimentales de temperatura interna del horno.

Además, con los (*punto 1*) con la temperatura T_1 es del ambiente y está muy bajo la temperatura así está cercano con la temperatura de mezcla adiabática (*punto 3*) con la temperatura T_3 .

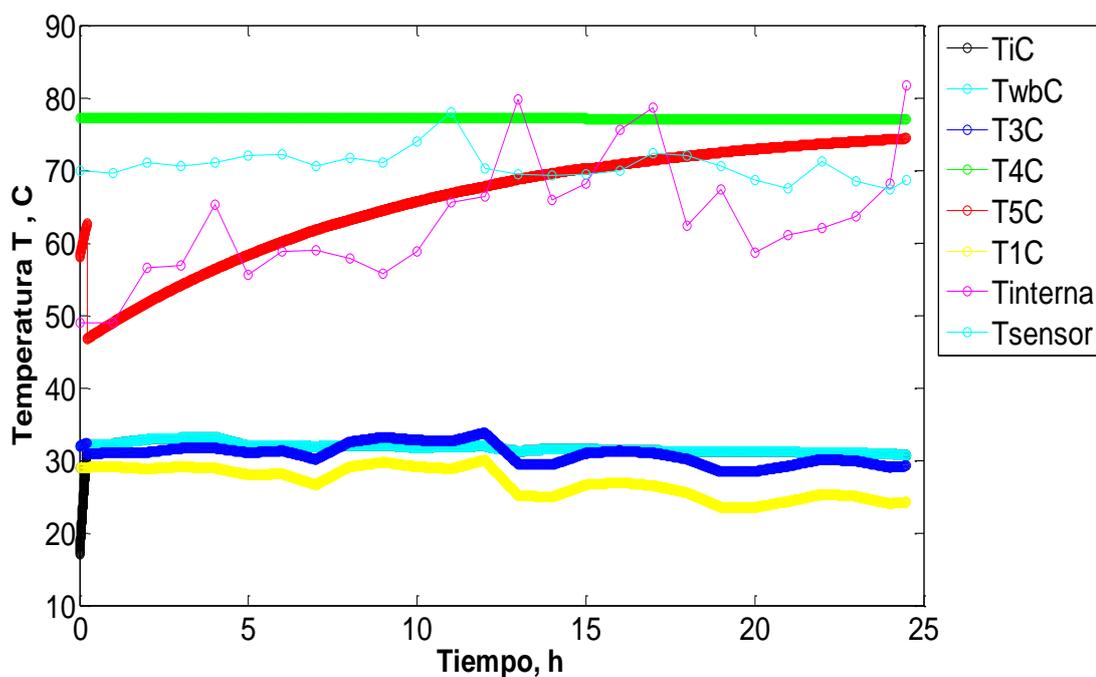


Figura 33: Temperatura (°C) en función del tiempo

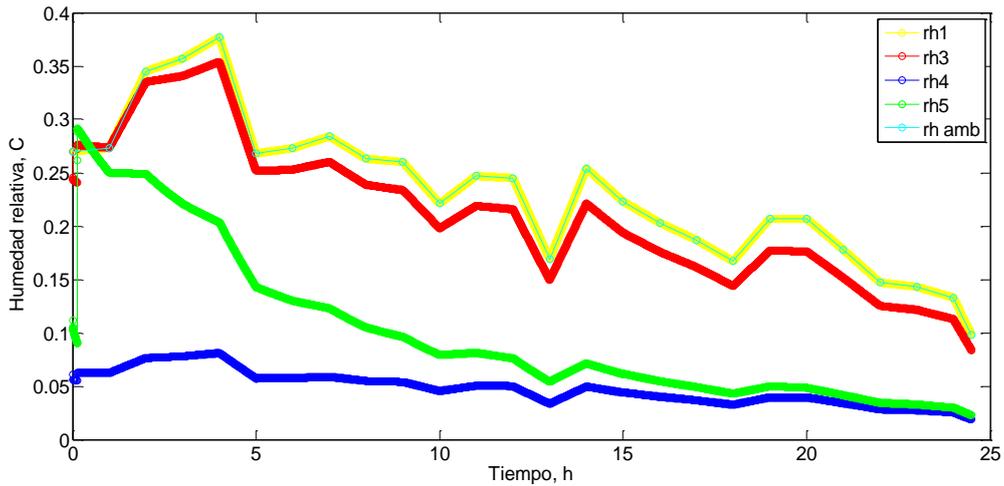


Figura 34: Humedad relativa en función del tiempo

Asimismo, los requerimientos de energía son menores cuando la longitud del horno es menor (comparando resultados para horno de 12m y de 1.4m).

Suministro energía necesario para secar 277.36 kg de chile en 24.5 h

varía entre 70 y 80.2 kJ/s con un promedio de 75.4420 kJ/s (52.8094 kJ suministrados al horno).

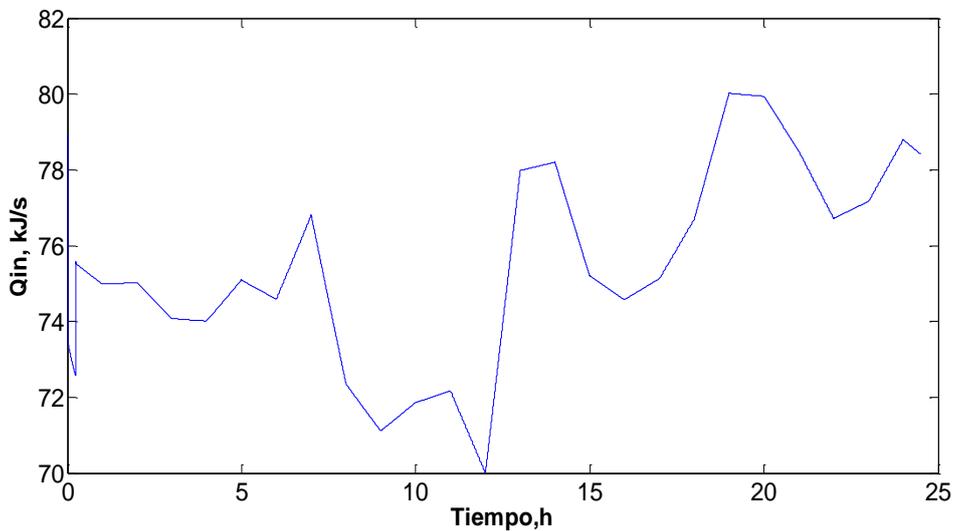


Figura 35: Cantidad de energía (kJ/s) en función del tiempo (h)

5.2 Simulación TRNSYS y datos climáticos

El diseño propuesto utilizará colectores solares para calentar agua y no aire, con la finalidad aprovechar el beneficio de almacenar el exceso de energía producido durante en algunas temporadas del año, para poder utilizarlo cuando existe ausencia de radiación solar. Esto se debe a que el agua tiene un calor específico más alto que el aire y que es posible su almacenamiento económico en un termo tanque que mantiene esa energía disponible para ser utilizada posteriormente en el proceso. En realidad, también el aire se puede almacenar, pero no es muy atractivo.

TRNSYS cuenta con una amplia información climática de varias partes del mundo, pero este trabajo fue realizado para la ciudad de Chihuahua-México y los datos de esta ciudad se encuentran en la base de datos del simulador.

Mediante las siguientes imágenes estaré representando el comportamiento de la temperatura, la humedad relativa y la radiación global anual en Chihuahua.

Como se puede observar en la Figura 32, se requirió de la integración de un gran número de módulos para elaborar el sistema de captación de energía solar, así como el sistema de calentamiento de aire. Los “Types” presentados en la Tabla 8, fueron estudiados, configurados e integrados a la hoja de trabajo para la simulación del sistema propuesto.

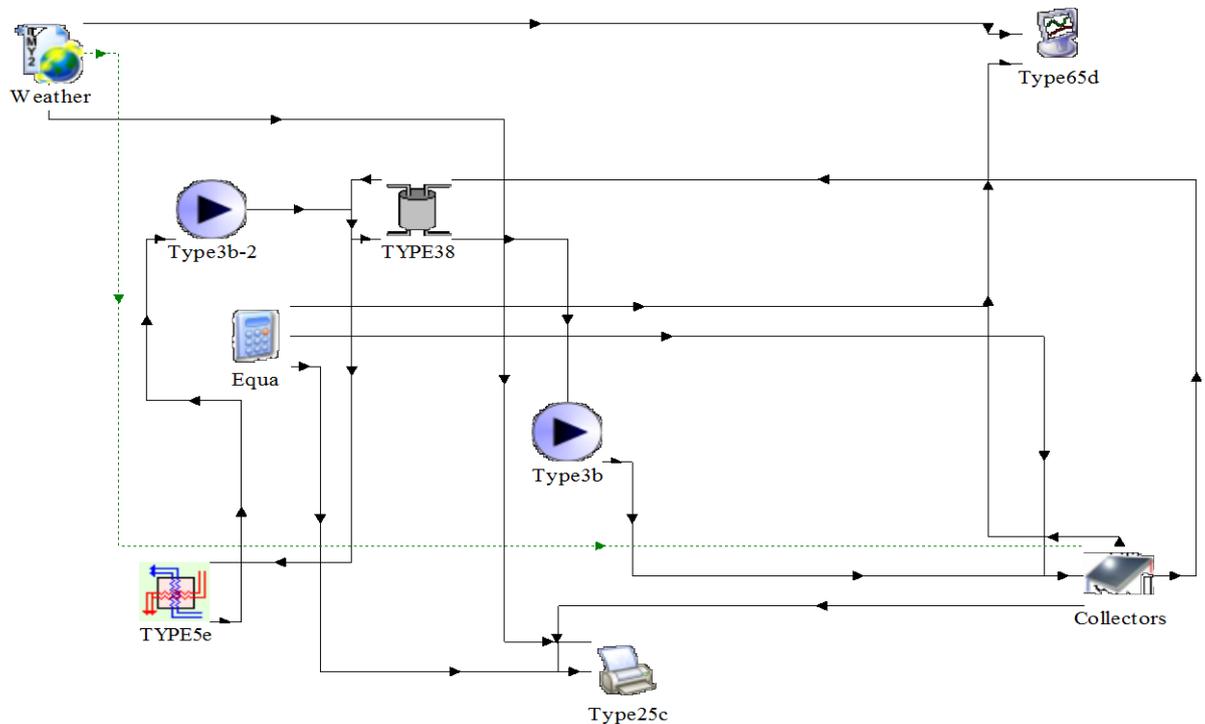
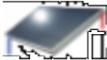


Figura 36: Etapa en el diseño del simulador de secado para Chile chipotle

Tabla 8: Descripción de 'Types' usados en el simulador

TYPE	ICONO	DESCRIPCIÓN
Type 54a	 Weather	Este componente lee la información climatología de una base de datos, además de procesar la radiación solar para la ciudad de Chihuahua.
Type 4a	 Tank	Modela el comportamiento térmico de un tanque de almacenamiento lleno de fluido y que está sujeto a estratificación térmica.
Type 71	 Collectors	Este componente modela el comportamiento térmico de un colector solar de placa plana
Type 25c	 Daily Results Impresora de valores	Este componente es utilizado para reportar las variables del sistema que son requeridas para un intervalo de tiempo definido.
Type 3d	 Pump	Modela el comportamiento de una bomba que maneja un flujo másico en base a la señal de control que esta entre 0 y 1.
Equation	 Parameters	En este componente es posible programar ecuaciones que pueden estar en función de las salidas de otros componentes, valores numéricos u otras ecuaciones previamente definidas.
Type 5e	 TYPE5e	Modela el comportamiento de un intercambiador de flujo cruzado un lado caliente y un lado frio y los flujos no se mezclan, dados los lados caliente y frio y una UA se da la efectividad del mismo.

5.3 ENERGIA EN EL SECADOR

TRNSYS se puede imprimir los resultados de la ganancia de energía por los colectores solares y desde estos colectores para el almacenamiento del tanque. A través de estos resultados que la impresora del TRNSYS imprimió, se determina la energía que podrá ser consumida dentro del sistema, tanta energía solar y el gas. A través TRNSYS se calculó el promedio de energía de la radiación solar en cada mes por lo que es fácil saber la cantidad de ahorro de energía que depende del gas LP. A través el modelo Matlab, se muestra que, la energía total requiere para secar el producto durante 48 horas era 75.4420 kJ/s.

Energía requerida=582.83 kJ/s *(2 días) =1165.66 kJ/s y

5.4420 kJ/s*(2 días) *(8 columnas) =1201.07 kJ/s.

Observaron que los dos valores de 1165.66 kJ/s y 1201.07 kJ/s fueron casi igual. Por tal este sistema indica que el balance de energía fue valido.

Tabla 9: Energía promedio que el sistema está aprovechando con solar y gas

MES	PROMEDIO DE ENERGIA SOLAR (KJ/S)	%ENERGÍA SOLAR (8 COLUMNAS)	% ENERGÍA SOLAR (1 COLUMNA)
ENERO	48.83	4.19	4.05
FEBRERO	55.36	4.75	4.59
MARZO	53.25	4.57	4.41
ABRIL	47.69	4.09	3.95
MAYO	41.87	3.59	3.47
JUNIO	39.49	3.39	3.27
JULIO	39.35	3.38	3.26
AGOSTO	41.20	3.53	3.41
SEPTIEMBRE	44.26	3.80	3.67
OCTUBRE	54.40	4.67	4.51
NOVIEMBRE	49.97	4.29	4.14
DICIEMBRE	48.25	4.14	4.00
Promedio:	46.99 kJ/s	4.03%	3.89%

Como se indica en la gráfica 42, la mayor captación de energía solar fue en los meses de enero a abril y en los meses de mayo a septiembre la captación de energía en los colectores solares bajó y eso es debido a que el ángulo de instalación de los colectores fue 43°. Con ese ángulo, durante el invierno la radiación solar pasa de forma normal (perpendicular) hacia los colectores, entonces hay un mayor aprovechamiento de captación de energía solar. Por otro lado, los meses de mayo hasta septiembre son meses calurosos en zona norte de México como Chihuahua, pero las radiaciones solares con ese ángulo de 43°, producen una radiación solar más baja hacia los colectores, por lo que el aprovechamiento de energía solar es menor. En la temporada de los meses de septiembre a diciembre hay una mayor radiación solar a través de los colectores. Entonces, con este sistema podríamos aprovechar alta intensidad de energía solar a través de los colectores en casi la mitad del año. Por esta razón se plantea el suministro de energía solar como solución para ahorrar energía producida por combustible gas, especialmente en temperaturas frías en Chihuahua.

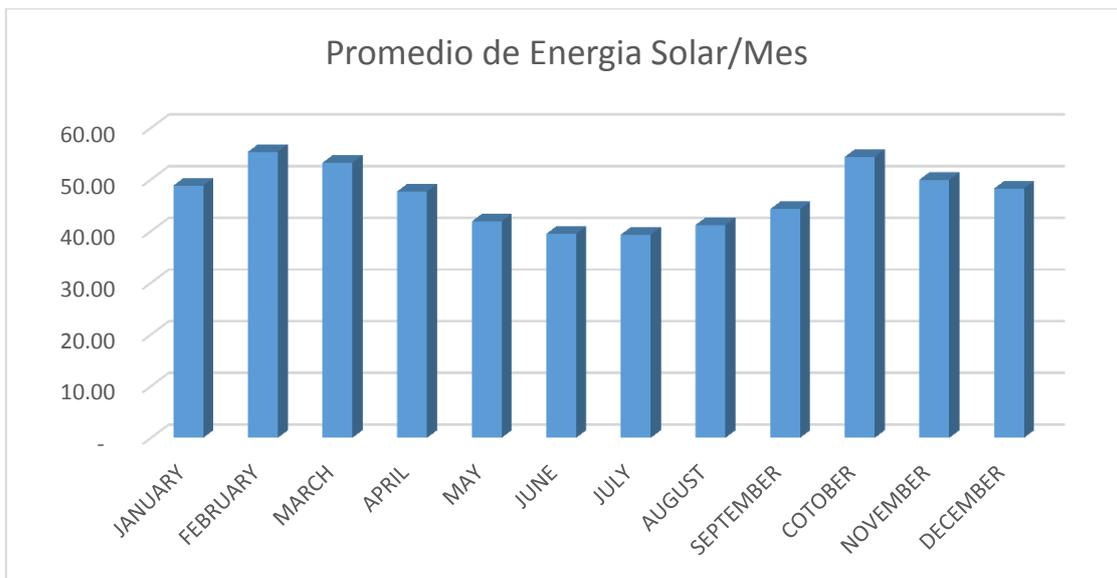


Figura 37: Promedio de energía solar por cada mes del año

Con la Gráfica 43, se indica que hay ahorro de energía del gas en los meses de enero a marzo y octubre a diciembre, los porcentajes de energía en cada mes variaron en una mayor proporción en los tiempos de calor, lo que significa que hay un elevado gasto de energía producida por combustible gas en estas temporadas en comparación con los meses de temperaturas bajas.

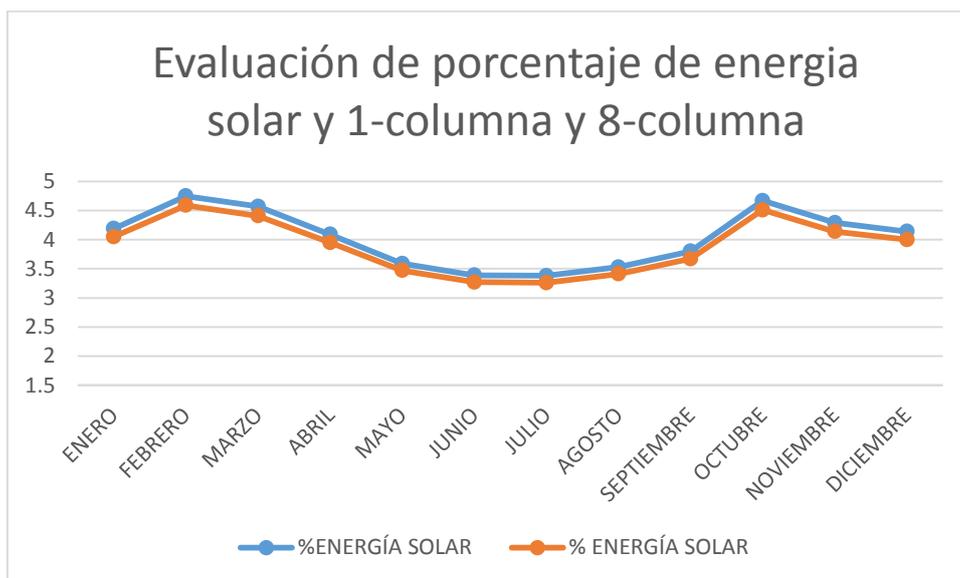


Figura 38. Evaluación del porcentaje de energía solar

En la Grafica 44, Se muestra la temperatura de un año típico en la ciudad de Chihuahua. En rojo la temperatura de ambiente y en azul la temperatura de bulbo húmedo. Un año típico se describe en un total de 8760 horas.

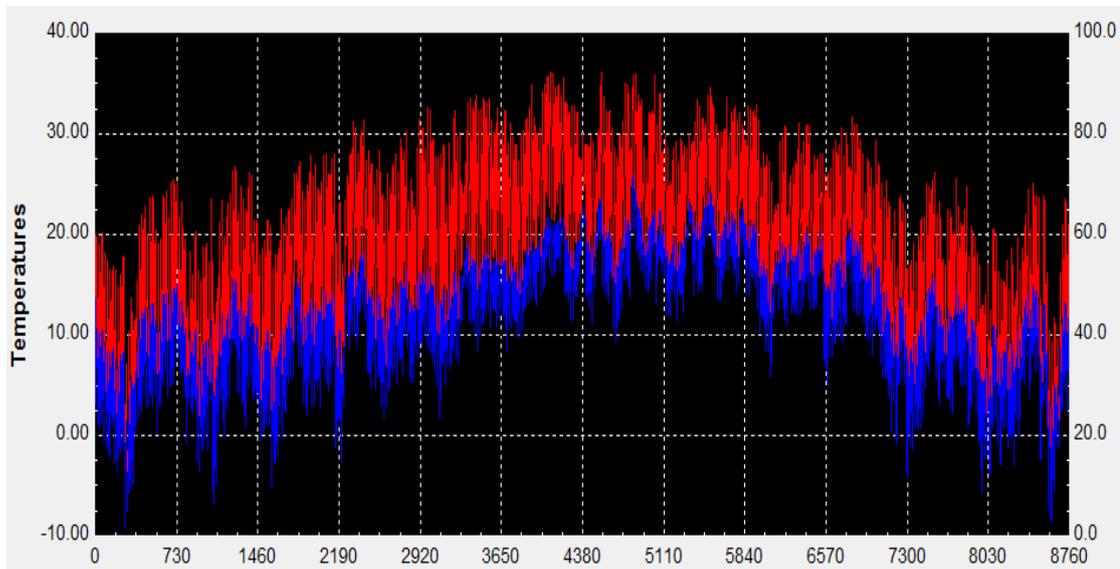


Figura 39: Las variaciones de temperatura ambiente y bulbo húmedo de un año típico

En la Grafica 45: Se observa en color rojo indica el comportamiento de la humedad absoluta en un año típico. La humedad en el aire aumenta durante la temporada de lluvias en Chihuahua, que son los meses de junio a octubre, con mayores concentraciones en Julio y agosto.

El uso de un termotanque resulta necesario ya que recoge el agua que regresa del intercambiador de calor, a una temperatura por lo general mayor que la que proporciona el servicio público, y una bomba hidráulica la extrae del termo tanque para llevarla a la red de colectores para que estos le eleven la temperatura y regresarla al termotanque con una temperatura mayor, al estar estratificado el termo tanque se evita que el agua se mezcle y de esta manera mantiene separada el agua aprovechando la diferencia de temperaturas en ella.

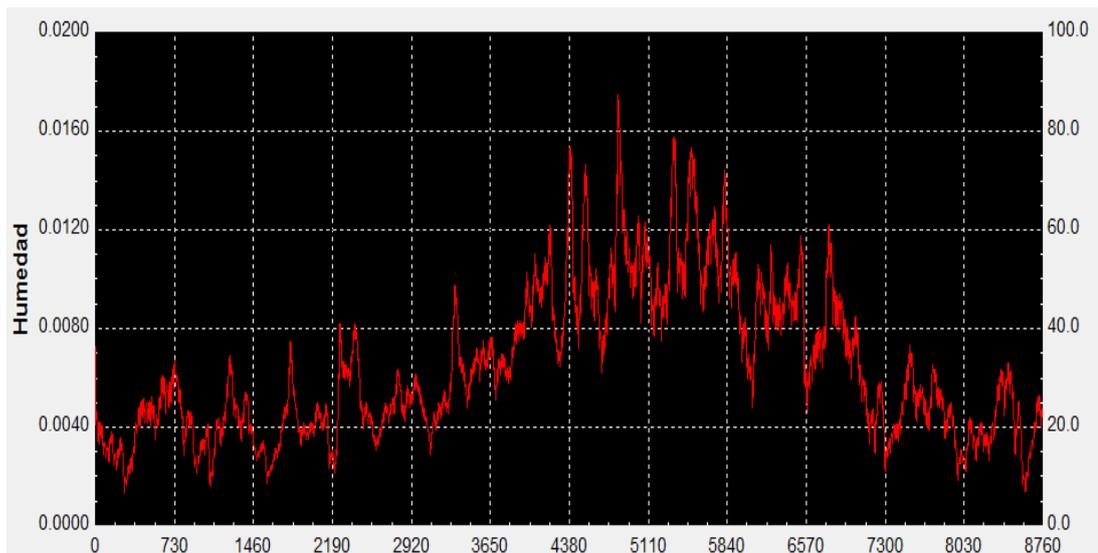


Figura 40: Humedad absoluta en un año típico de chihuahua

La gráfica 46 nos muestra muy representativamente el comportamiento de la temperatura del agua al salir del intercambiador de calor y entrar al termo tanque y la temperatura del agua al salir del termo tanque. Las parábolas de la gráfica muestran el periodo diario de funcionamiento del sistema. Se puede apreciar que el agua sale del intercambiador de calor con una temperatura menor y al salir de los colectores solares y en consecuencia del termo tanque, el agua ya elevó su temperatura.

Temperatura del H₂O de entrada al Termotanque

Temperatura del H₂O de salida al Termotanque

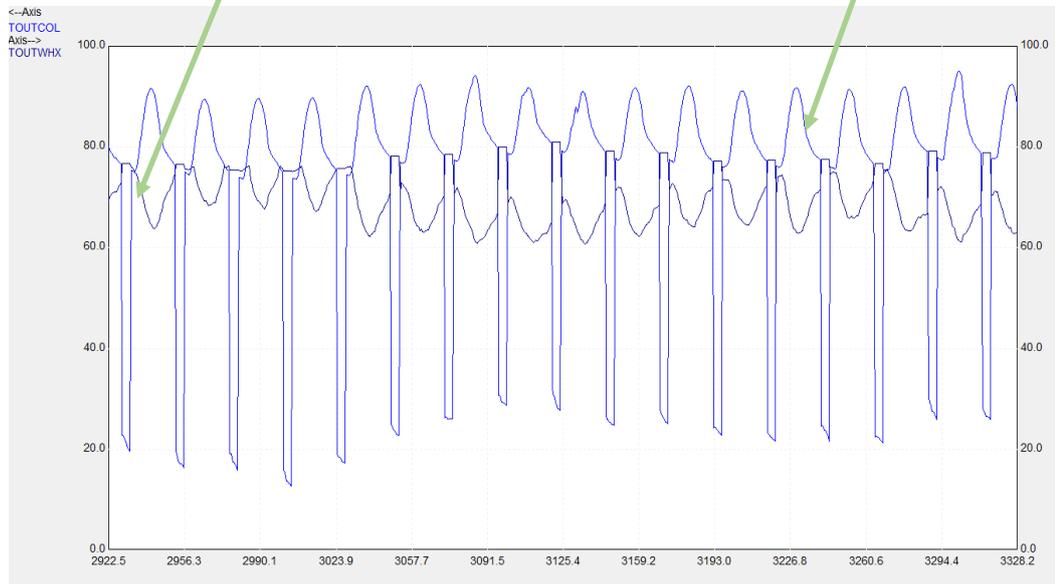


Figura 41: Temperatura de entrada y salida del agua del termo tanque en °C

La grafica 47: Se indica la relación entre la humedad en al ambiente y la temperatura ambiente en la simulación. Vieron que en los meses donde baja la temperatura, la humedad relativa aumenta más.

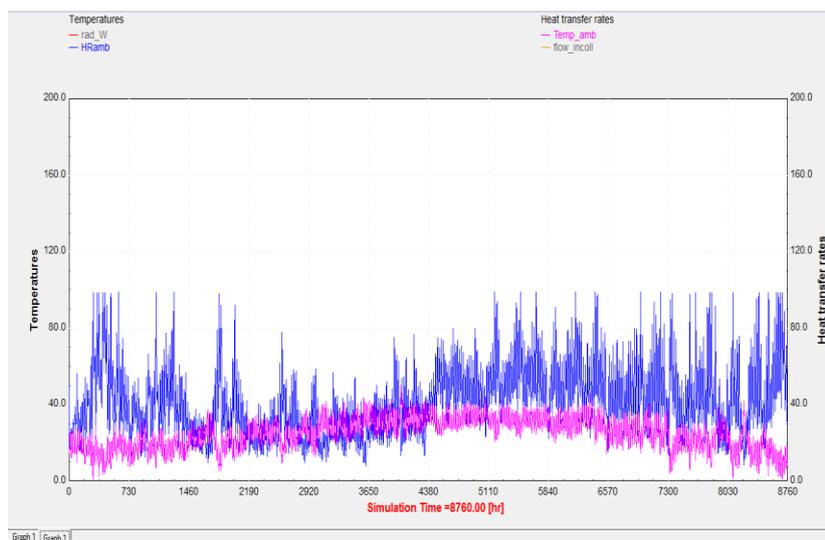


Figura 42: Simulación de las variaciones de temperatura ambiente y Humedad relativa ambiente

La cantidad de vapor de agua que puede contener una masa de aire, de pende de la temperatura. A medida que va aumentando la temperatura del aire, éste es capaz de contener

más humedad. Por eso, el aire tiene menos capacidad para contener vapor de agua a 5 °C que a 15 °C.

Si la temperatura del aire y el contenido de humedad permanecen constantes, no habrá una variación de la humedad relativa.

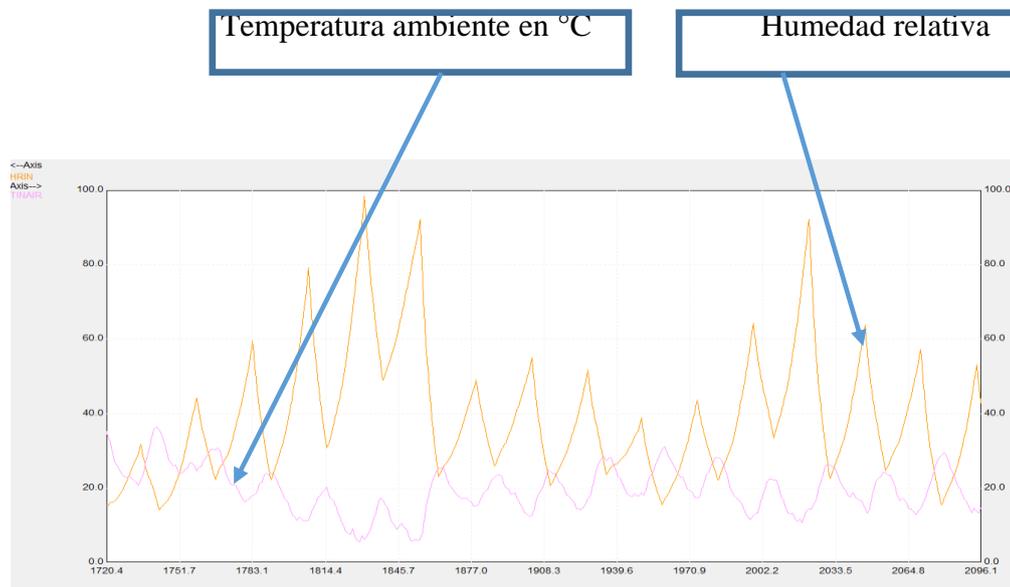


Figura 43: Grafica de la relación de temperatura del aire-HR

Si en cambio, la temperatura del aire aumenta y el contenido de humedad permanece constante, la humedad relativa disminuye. Esto es así porque, con un incremento en la temperatura aumenta la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener esa masa de aire. Además, si el contenido de humedad (de vapor de agua) en el aire permanece constante y su temperatura desciende, la humedad relativa aumenta. Ya que, al decrecer la temperatura del aire, disminuye su capacidad para contener vapor de agua. Si el aire continúa enfriándose llegará un momento en que podrá alcanzar el punto de saturación. A partir de ese momento podría empezar la condensación del vapor de agua.

La Grafica 49, muestra la relación que hay entre la temperatura y la humedad relativa, podemos ver que al inicio del año la temperatura es relativamente baja y a temperaturas bajas la humedad relativa es alta, luego en los meses cálidos hay un aumento de temperatura y una consecuente disminución de la humedad relativa; pero, al iniciar la temporada de lluvias vemos una temperatura relativamente alta y un aumento en la humedad relativa esto es a consecuencia de una humedad absoluta mayor; y al término del año tenemos una disminución de la temperatura al entrar el invierno.

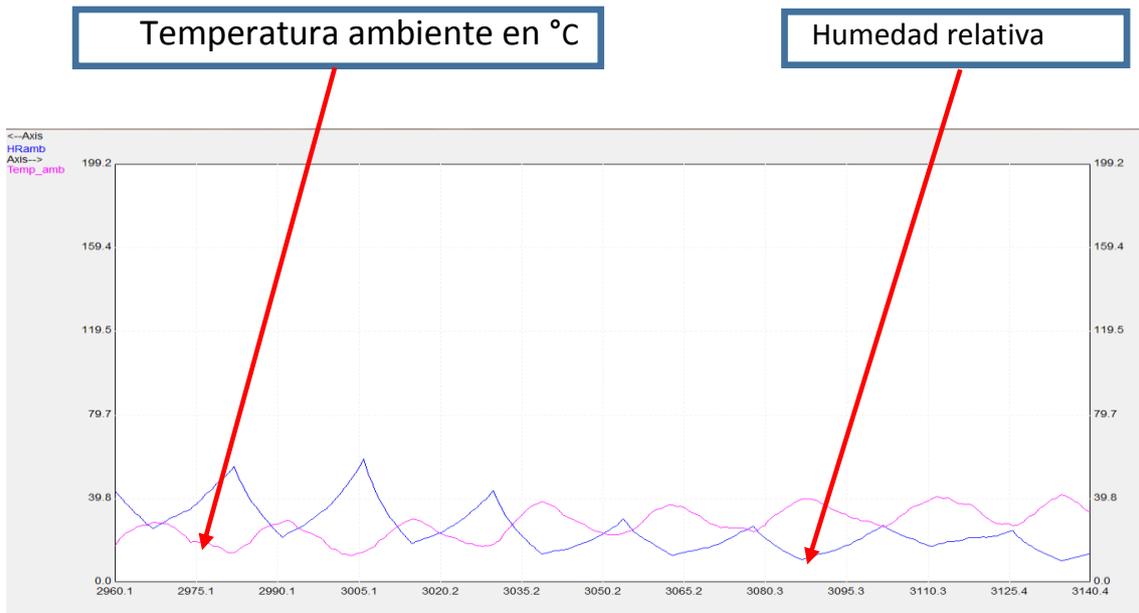


Figura 44: Gráfica con acercamiento de la relación HR-Temperatura en el mes de mayo a junio.

Grafica 50, El aire al salir del intercambiador lleva una temperatura mayor y estable y una humedad relativa menor, siendo de esta manera apto para ingresar a la cámara de secado y cumplir con su función

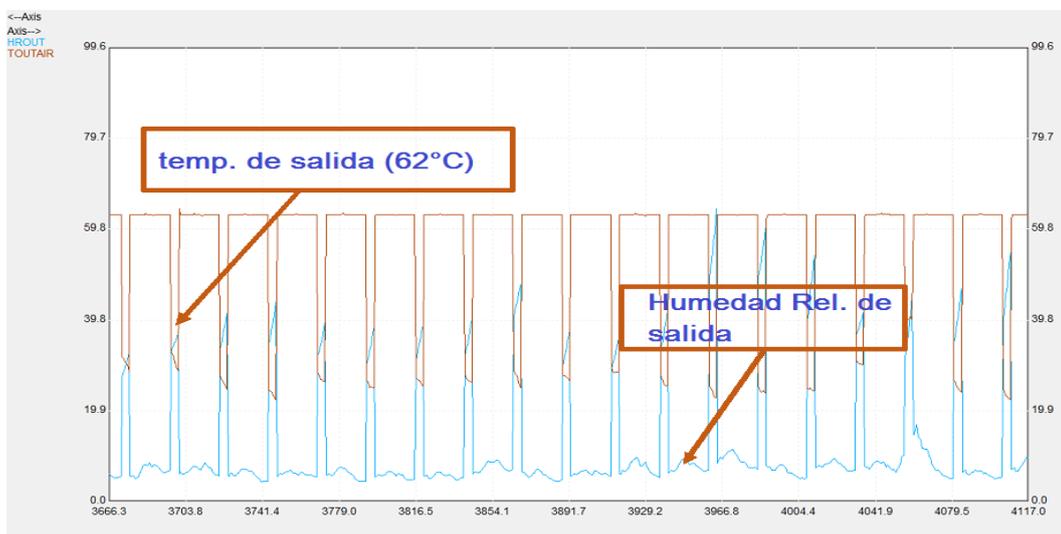


Figura 45: Gráfica de las características del aire al salir del Intercambiador

La grafica 51; observaron que el agua que está entrando en intercambiador de agua-aire lleva una temperatura mayor de 68 °C. Con una temperatura ambiente de 25 °C; El agua va a calentar el aire, y el aire va a salir con una cantidad de energía y a través el calentador se aumenta hasta los 77 °C antes de entrar al horno.

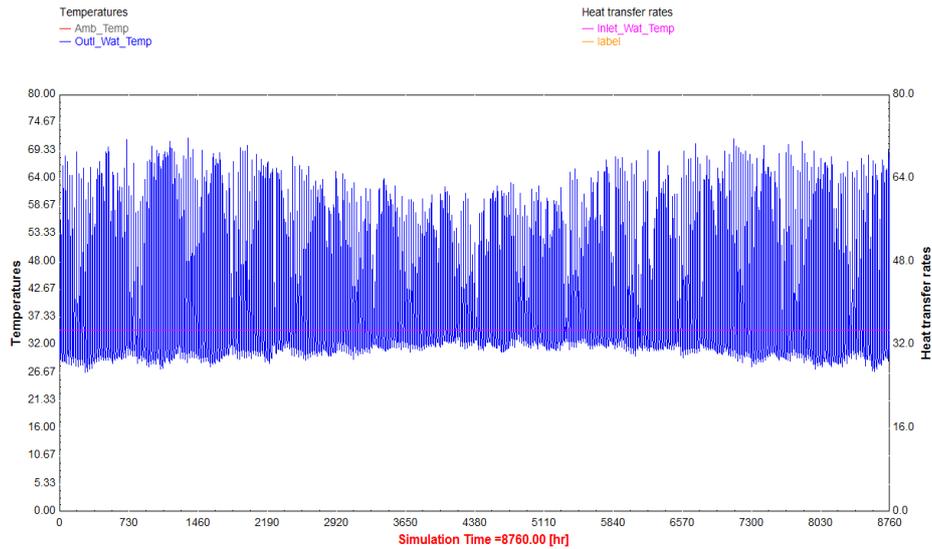


Figura 46: Simulación del intercambiador de calor de agua-aire

La gráfica 52; corresponde a las mismas condiciones de simulación de la gráfica 52. Esta gráfica indica la variación en la temperatura ambiente durante la simulación. Se observa un aumento en la temperatura, especialmente los meses de julio a noviembre, que podemos relacionar con la orientación del ángulo solar, normal con radiación solar. La línea rosa indica el flujo constante del agua dentro de los colectores

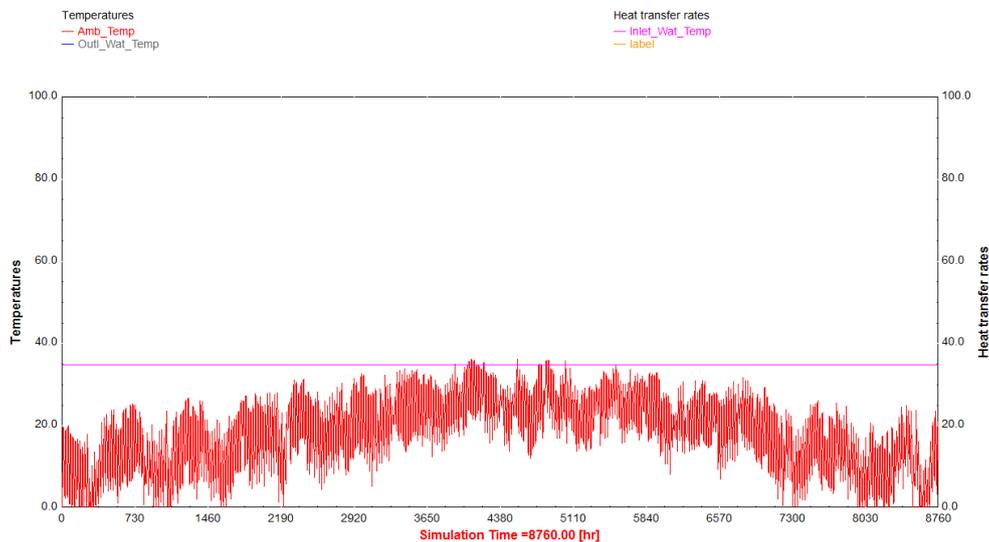


Figura 52: Temperatura ambiente en Chihuahua para un año típico

En la gráfica 53, el color rosa indica la temperatura promedio del agua en la salida del tanque (outlet), esto muestra que en el período de invierno la radiación solar aumenta, debido a que

el ángulo de los colectores utilizados en la simulación TRNSYS fue 43°. Esto significa que en el período de invierno la radiación del sol pasaba en dirección normal del colector y en el período de verano la radiación pasa al colector en ángulos menores. Por lo tanto, el colector solar no recoge la suficiente radiación. En el gráfico correspondiente a estos meses de junio a septiembre, se observa que la temperatura fue baja en comparación con enero a abril y septiembre a diciembre.

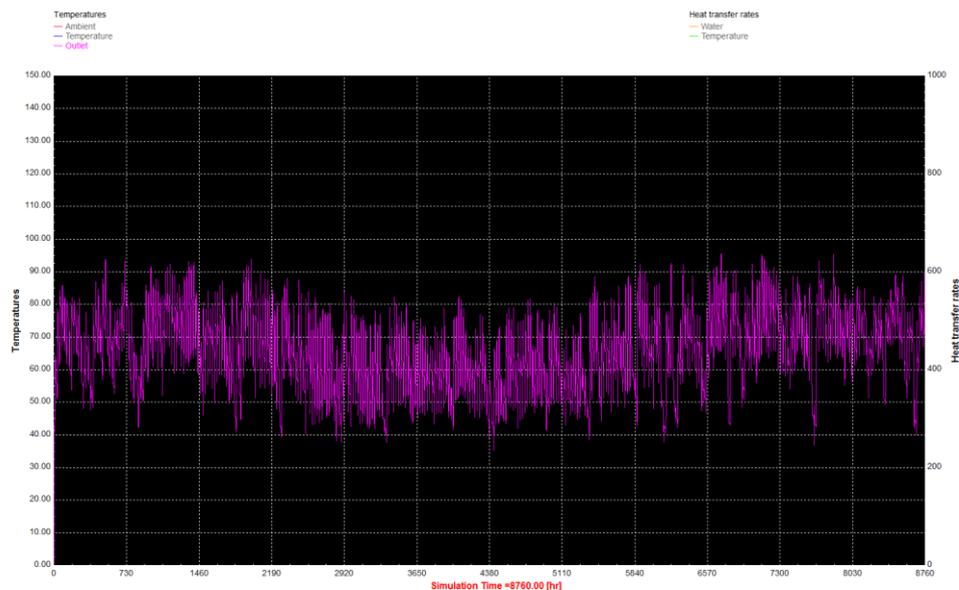


Figura53: La temperatura promedio del agua en el tanque (outlet) por año

También en la gráfica 54, indica que la temperatura ambiente no tiene nada que ver con el ángulo de los colectores. En el verano, automáticamente la radiación solar empieza a calentar a la superficie de la tierra y entonces aumenta la temperatura en el ambiente. En el invierno, sucede el efecto inverso. Por lo tanto, la gráfica de temperatura ambiente aumenta más en el verano y baja mucho en los meses de invierno.

Se monitoreó en los colectores de placa plana, la temperatura de salida hacia el tanque de almacenamiento, obteniendo los valores mostrados en la Gráfica 53. Se observa una temperatura de estancamiento que se debe a que la bomba de recirculación no trabaja cuando el tanque reporta una temperatura de 90 °C.

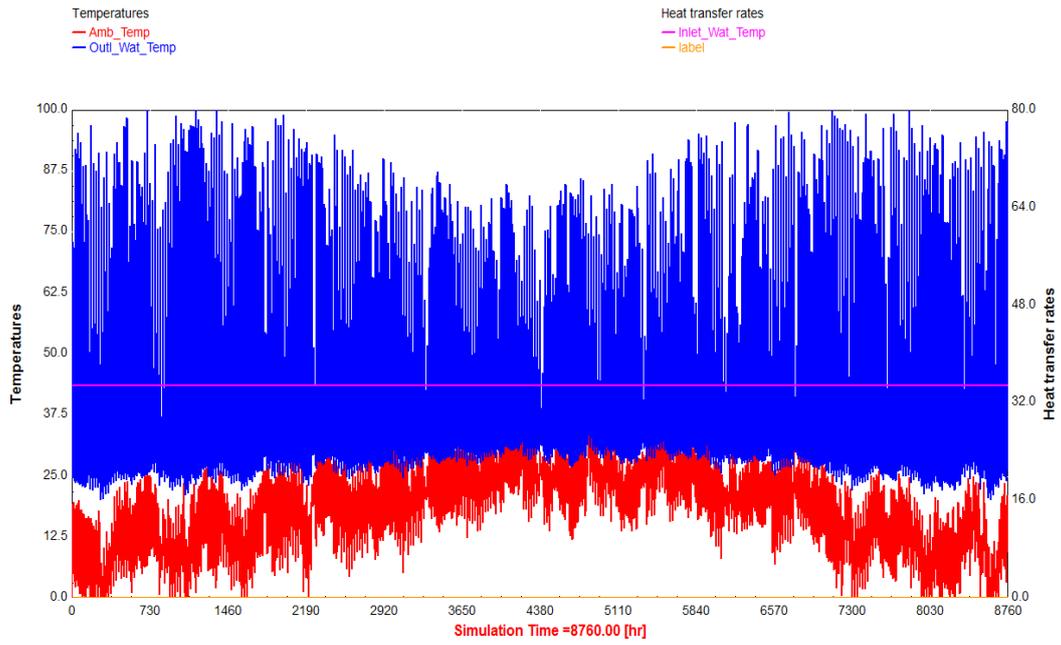


Figura54: Comportamiento térmico en la salida del colector

5.3 Discusión

En revisión bibliográfica, se buscaron publicaciones de secadores para Chile y otros alimentos. Eso fue para observar diferentes funcionamientos de los hornos de alimentos y también para determinar los tiempos de velocidad de secador, la temperatura y cantidad de Chile que se secan en cada lote. Dado que en la revisión bibliográfica que se llevó a cabo, previa al desarrollo del proyecto, no se encontraron publicaciones que describan secadores híbrido solar-gas para secar Chile.

Sin embargo, el secador solar reportado por [Biplab, P & S.P, Singh, 2013] fue diseñado e instalado en la planta piloto del Instituto de Energía Solar de la Universidad Ege para su uso en zonas áridas, y tenía una capacidad de carga de 80 kg. También el diseño consiste en dos partes principales: - Un calentador de aire solar y una cámara de secado.

Durante los experimentos que hicieron para determinar el tiempo de secado, el calentador de aire combinado con el colector estaba orientado en dirección al sur con un ángulo de colector de 30 °C.

El techo y otros lados de la cámara de secado fue diseñada usando poliéster que contiene lana de vidrio como el material de cubierta. Ocho bastidores de metal se colocaron dentro de la cámara y la distancia entre cada bastidor fue de 12 cm.

Una tapa abierta capaz estaba conectada a la parte norte de la cámara, con el fin de poner los productos en el interior de la cámara de propósito de secado. Un ventilador controlado por una válvula manual se utiliza para forzar el aire de secado a través del colector y a la salida de aire de la cámara de secado. Un calentador solar y uno eléctrico se utilizan para calentar el aire y mantener las temperaturas de entrada adecuadas del fluido de trabajo (aire). Un dispositivo analógico proporciona el control de la temperatura. La velocidad de flujo del aire se midió a través de un medidor de flujo digital que se colocó en la entrada del calentador de aire solar. Las intensidades totales de radiación solar se midieron con un piranómetro de tipo estrella que tenía la misma pendiente que el calentador solar. Los tiempos de secado de los productos naturales secados al sol oscilaron entre 8 y 14 días en comparación con los tiempos de secado de los Chile con colectores solares fueron de 2.8 días [Cigdem Tiris, et al., 1995].

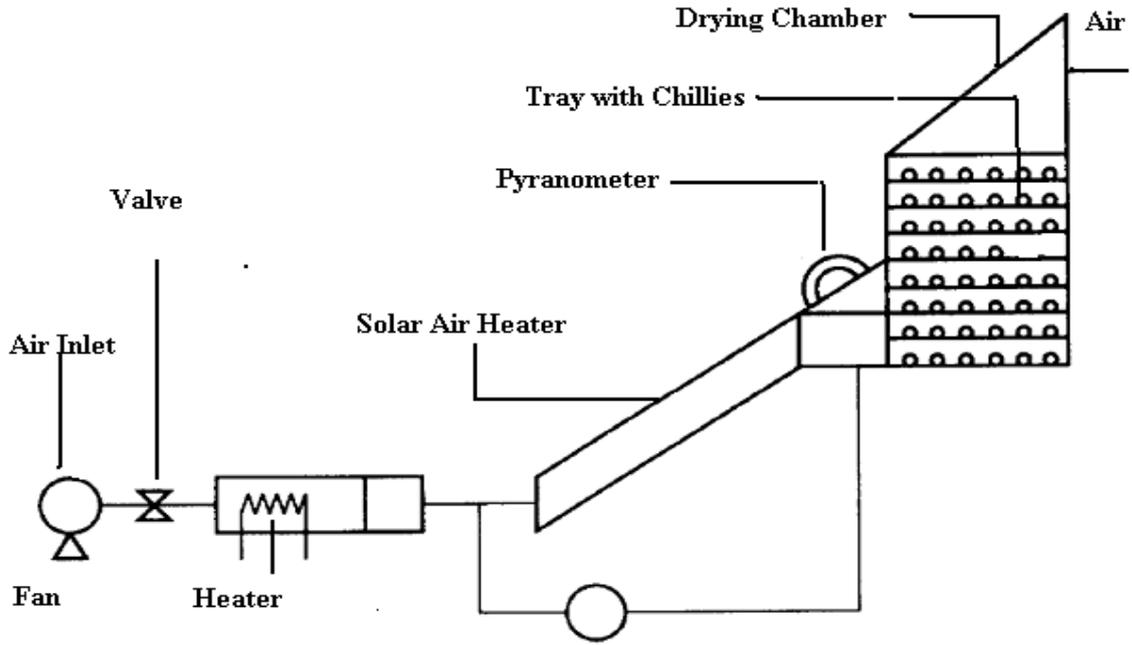


Figura 55: Un Secador solar –eléctrica para chile

En el presente proyecto desarrollado, se puede secar 4375 kg de chile cada 48 horas (2-días) y está diseñando para usar dos fuentes de energía del gas LP y sistema solar para precalentamiento del aire. En este sentido, el diseño fue mejor debido a la reducción del tiempo durante el proceso de secar chile en un 40% de tiempo total con respecto al sistema reportado por Biplab (2013). También se observa que se puede secar mayor cantidad de chile comparados con los sistemas existentes.

CAPITULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se cumplió con el objetivo de desarrollar un modelo matemático utilizando como herramienta de simulación el software MATLAB, para el cálculo de los balances de masa y energía de un sistema de horno para el proceso de secado de chile considerando un secador de bandejas donde los resultados concuerdan con los datos experimentales.
- Se realizaron pruebas experimentales para determinar las curvas de velocidad de secado un sistema de horno tamaño piloto, determinar los tiempos de secado y la temperatura, a través de estas condiciones, se observaron que, la temperatura de 80 °C se quemó el chile, por lo que observaron que la temperatura requerida para el proceso de secado fue de 77 ± 2 °C.
- Se realizaron pruebas experimentales para determinar curvas de velocidad de secado en un sistema de horno tamaño piloto, bajo condiciones de temperatura de 77 ± 2 °C . A través de estos datos fue posible validar el modelo a través de la comparación de los resultados obtenidos por el modelo y los resultados experimentales. Se obtuvo un error de $\pm 12\%$ entre los datos de porcentaje en peso experimental y el calculado por el modelo.
- A través del modelo, se consideraron diferentes dimensiones de horno y velocidades de flujo volumétrico de aire para determinar los requerimientos de energía del sistema de horno, considerando un sistema de recuperación de calor por recirculación del aire.
- A través del software TRNSYS se realizó una evaluación de energía solar, bajo las condiciones ambientales de temperatura y humedad de un año típico en Chihuahua. Se calculó por mes, el promedio de energía solar captado en un período de 48 horas. Los resultados mostraron una mayor captación en los meses de invierno, con una máxima en el mes de febrero de 55.36 kJ/s.
- Se determinaron los aportes de energía solar para el precalentamiento del aire, dando como aproximado un 4% del total de energía requerido en cada proceso de secado.
- Se consiguió un sistema seguro en la cual la intervención de la persona es mínima a comparación de los sistemas tradicionales que requieren personas vigilando el sistema

y de dar vuelta el chile durante todo el día, aparte de lograr un producto terminal de buena calidad y presentación y de un ahorro significativo de espacio y tiempo, que al final favorece al productor.

A manera de recomendación se sugiere:

- Dar mantenimiento cada semana a la máquina para eliminar residuos o evitar la formación de óxido dentro de la cama del chile.
- Para mejorar el nivel de captación del colector solar se podría hacer un control de giro que valla moviendo el colector conforme transcurre el día de esta manera obtenemos siempre la máxima radiación solar posible.
- Se considera que lo desarrollado en éste proyecto hibrida solar-gas puede ser una contribución importante al estudio y diseño de sistemas de secado asistidos con energías renovables.

CAPITULO VII

7. REFERENCIAS

1. Almeida P., Carvalho M.J., Amorim R., Mendes J.F., Lopes V., 2014. Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy* 104: 60-70.
2. Ayensu A. 2003. Thermal Convection and moisture- diffusion in thin- layer fixed- bed solar drying. *Quarterly science vision* Vol. 9(No. 1-2 & 3-4); p 67 -81.
3. Belessiotis V. & Delyannis E. 2011. Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691.
4. BHANDARI, Besh; DATTA, Nivedita and HOWES, Tony. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. En: *Drying Technology*. Vol. 15, No. 2; 1997; p. 671-684.
5. Caro Encalada M., Leyva Morales C., Ríos Santana J., 2014. Competitividad mundial de la producción de chile verde de México. *Revista de Economía XXXI* (83): 95-128.
6. Castañeda Miranda A., González Parada A., Guzmán Cabrera R., Ibarra Manzano O.G., 2012. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Acta Universitaria, Dirección de apoyo a la investigación y al posgrado. Universidad de Guanajuato*. 22(3):14-19.
7. Construcción de un secador charolas giratorio y su valoración con ajo, Huajuapán de León, Oax. Abril 2006.
8. D.C. Ramón Olivas Vargas, 2003 “Producción De Chile Chipotle De Calidad Uniforme Utilizando Gas Combustible y Leña”
9. FAOSTAT. 2011/2012. Modulo comercio. [http:// faostat3.fao.org/faostat-gateway/go to/home/E](http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/home/E)
10. FITO, P., Andrés A., Barat J., Albors A. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, editorial U.P.V. 210 p.
11. Foust S. Alan, (1993), *Principios de Operaciones Unitarias*, 4ª Ed.,CECSA, Cap. 18.
14. Gaytan D., y Benita F., 2014. On the competitiveness of Mexico’s dry chili production. *Economics of Agriculture* 61(2): 307-317.
15. Geankoplis, C.J. (1995), *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, 2ª Ed. CECSA
16. Ibarz, A. et al. *Métodos Experimentales en la Ingeniería Alimentaria*. Zaragoza: Acribia, 2000; p. 89-104

-
17. JANGAM, S.V., Law, C.L., & Mujumdar, A.S. (2011). *Drying Of Foods, Vegetables And Fruits*, Volume 2. ISBN: 978-981-08-7985-3.
 18. Kalogirou S. 2009. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Amsterdam; London: Elsevier/Academic Press, ISBN 9780123745019 (hbk.)
 19. Keey, R.B. 1980. *Theoretical Foundations of Drying Technology*, In *Advances in Drying*, Vol 1. Mujumdar, A.S. (Ed.), Hemisphere Publishing, Washington, Pp 1-22.
 20. Klein, S.A. & Arias, D.A., TRNSYS 16 a Transient System Simulation Program Volume 5 Mathematical Reference, 2000
 21. Klein, S.A., & Alvarado, F.L, 1992-98. *Engineering Equation Solver for Microsoft Windows Operating Systems*
 22. Koch, Wolfgang and LICHT, William. *New Design Approach Boosts Cyclone Efficiency*. En: *Chemical Engineering*. Vol. 84; November 1977.
 23. Land Van't, C.M. *Spray drying Handbook*. Quinta edition. London: Longman Scientific & Technical, 1991. Vol. 9, No. 5; March 1984; p. 70-77.
 24. *Manual de laboratorio de operaciones unitarias II*, Santa Ana de Coro, Julio 2009
 25. Martín, I. R. (2004). *Desarrollo de un simulador para la optimización termo-económica de viviendas de interés social*.
 26. Masters, 1991, *Spray drying Handbook*. Quinta edition. London: Longman Scientific & Technical, 1991.
 27. MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOT, Peter. *Operaciones básicas de ingeniería química*. Cuarta edición. Mc Graw Hill, 1991. p. 198
 28. Norma Mexicana NMX-FF-108-SCFI-2007 *Productos Alimenticios – Chile Chipotle o Chilpotle (Capsicum annum) – Especificaciones y Métodos de Prueba*.
 29. Pérez-Rodríguez Carlos, M.C., *Propuesta de una Norma de Calidad para Chile Chipotle.*, 2003.
 30. Perry, C. et al. *Manual del ingeniero químico*. Tercera edición. Mc Graw Hill, 1992. tomo V. p. 20-63 a 20-67.
 31. Perry, R. H., Chilton C.H., (1986), *Manual del Ingeniero Químico*, 5ª Ed., Mc Graw Hill, Vol II, 2

-
32. Pillajo García, J. V., & Castillo Olalla, L. E. (2007). Diseño y construcción de un calentador solar de agua con capacidad de 200 litros para el laboratorio de energías no convencionales del departamento de Ciencias de la energía y mecánica.
 33. Rico López, E. Análisis de la producción y ahumado de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 85 p.
 34. Robayo, Olga. Extracción y secado por atomización del colorante de mora de castilla. Tesis: Especialista en ciencia y tecnología de alimentos. Universidad Nacional de Colombia. 2000. p. 12-25.
 35. SIAP, 2010. Un panorama del cultivo de chile. Reporte monográfico anual. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, México City, México.
 36. Stoecker W.F. 1989. Design of thermal systems. 3rd ed. McGraw-Hill. ISBN 0070616205
 37. Surface diffusion and water vapour transport mechanism. (Adapted from Bruin, S. and Luyben, K.Ch.A.M., in *Advances in Drying*, Vol. 1, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing, New York, 1980.)
 38. Treybal R.E., (1993), Operaciones de Transferencia de masa, 2ª Ed., Mc Graw Hill, Cap. 12
 39. Vargas, D. R. O. (2003). Producción De Chile Chipotle De Calidad Uniforme Utilizando Gas Combustible Y Leña.
 40. Yunus A. Cengel, (2003), Transferencia de calor, 2ª Ed., Mc Graw Hill.