

# **Modelo de Simulación del Funcionamiento de un Secador Solar de Placas Planas**

**Arquímides X. HARO**

**Escuela de Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba, Chimborazo, Ecuador**

**María I. PARRA**

**Centro de Energía y Refrigeración, Universidad de Oriente  
Santiago de Cuba, Oriente, Cuba**

**Yolanda E. LLOSAS**

**Escuela de Automática, Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo, Manabí, Ecuador**

**Milton P. LOPEZ**

**Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba, Chimborazo, Ecuador**

**Nelly P. PERUGACHI**

**Escuela de Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Riobamba, Chimborazo, Ecuador**

## **RESUMEN**

A pesar de las ventajas prácticas de la simulación computacional, hay sistemas que son extremadamente difíciles de simular, dado su complejidad e imprevisibilidad en el tiempo, especialmente si se asocian a los parámetros meteorológicos, como es el caso de los secadores solares. En este trabajo de investigación, con la finalidad de contribuir con el desarrollo de esta tecnología, se propone usar la Teoría del Caos, como base del funcionamiento de un modelo de simulación de un secador solar de placas planas, en el cual se simula la variación de temperatura en el colector solar, la cámara de secado, tanto al ingreso como a la salida de las mismas, usando como datos de entrada, parámetros meteorológicos predichos con la teoría del caos, para lo cual se ha desarrollado un programa computacional en Visual Basic y usado el modelo Tisean, para obtener un modelo predictivo de su funcionamiento, cuyos resultados se verifican con un prototipo experimental construido, con el que se demuestra estadísticamente que no presentan diferencias significativas al 95 % de significancia.

**Palabras claves:** Secador solar, modelo de simulación, teoría del caos, energía solar, altiplano ecuatoriano.

## **1. INTRODUCCION**

Los requerimientos de energía y la disminución de las fuentes tradicionales, conducen a la búsqueda de nuevas fuentes de energías más limpias y renovables que contribuyan a proteger el medio ambiente y aprovechar mejor los recursos naturales, siendo una de las más importantes, la energía solar [1-3].

El secado es un proceso ampliamente conocido desde tiempos remotos, para diferentes fines, entre ellos, en la conservación de alimentos [4-7]. En el altiplano ecuatoriano, los métodos de secado que se han aplicado son: secado solar natural u otras fuentes de energía tales como: la combustión de madera, combustibles fósiles o electricidad, que no resultan óptimos o son muy contaminantes, por lo que es necesario estudiar otros procesos [8-11].

La literatura especializada reporta el éxito en la aplicación de secadores solares eficientes, en cuyo estudio se puede usar como herramienta fundamental la modelación matemática, que permite mejorar los diseños [12-14].

La mayor parte de la tecnología relacionada con el secado solar se ha desarrollado en países de latitud media. En la zona ecuatorial, el clima tiene un comportamiento más regular, con una gran variedad de productos agrícolas que se cosechan permanentemente, de ahí es menor la necesidad de conservar los mismos; sin embargo, estos recursos podrían aprovecharse mejor con secadores solares [7-14].

El altiplano ecuatoriano presenta ventajas para el aprovechamiento de la energía solar, por la regularidad de incidencia de la radiación durante los diferentes días del año dada su posición geográfica, alcanzando valores altos de radiación media efectiva, de alrededor de los 520 W/m<sup>2</sup> en las doce horas de sol y 10 horas de sol diarias efectivas según la OMM, dado su altura respecto al nivel del mar y su posición geográfica [14].

En Ecuador constituye un problema el aprovechamiento de la energía solar, debido a la deficiencia tecnológica, sumado a que la tecnología que existe en el mercado no se adapta necesariamente a sus condiciones físicas o climáticas particulares, además de la variación de la dinámica atmosférica, comúnmente turbulenta, debido al fuerte intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera y viceversa, por su posición geográfica y altura respecto al nivel del mar, lo que dificulta establecer su estado dinámico [15-17].

La teoría del caos, trata sobre sistemas dinámicos complejos difíciles de predecir, los modelos estudiados en la teoría del caos, se basan en la geometría fractal y el espacio de las fases para establecer el comportamiento dinámico de los sistemas complejos, los que han introducido considerables mejoras en la exactitud de las previsiones meteorológicas en comparación con otros, en especial para cortos períodos de tiempo y la que disminuye su precisión al incrementarse el tiempo [18-22].

La investigación busca en función de la caracterización del comportamiento físico y meteorológico de la zona, aplicar la teoría del caos, para elaborar un modelo matemático que permita simular el funcionamiento de un secador solar mixto. Se propone usar aquellos trabajos desarrollados por Duffie y Beckman [12], en el colector solar y balances de energía y masa en la cámara de secado [7].

El estudio se desarrolla en la ciudad de Riobamba (Latitud: 1° 39' 58" S Longitud: 78°39' 33" O, altura respecto al nivel del mar 2750 m.), en el altiplano ecuatoriano, Ecuador, Sur América. Para verificar los resultados de la modelación se cuenta con un prototipo de secador que realiza las medidas necesarias para comprobar estadísticamente el funcionamiento del modelo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Teoría del caos

Los datos de una serie pueden caracterizarse usando la teoría del caos, iniciando con la reconstrucción de las series en el espacio de las fases, para lo cual se debe determinar el tiempo de retardo y la dimensión de encaje, las cuales permiten representar dichos datos en un espacio multidimensional, en el cual se estudian sus propiedades dinámicas como la dimensión fractal y la entropía del sistema, siendo los coeficientes de Lyapunov uno de los indicadores más importantes del sistema, con los que se determina si el sistema es caótico o no, también se puede predecir el comportamiento futuro de los datos [17].

**Reconstrucción de una serie de tiempo en el espacio de las fases.-** Una serie de tiempo puede considerarse como una secuencia de observaciones  $\{S_n = S(x_n)\}$ . Puesto que la secuencia (generalmente escalar)  $\{S_n\}$  en sí misma no representa adecuadamente el espacio de fase (multidimensional) de los sistemas dinámicos, se tiene que emplear alguna técnica para determinar la estructura multidimensional utilizando los datos disponibles [20]. La técnica de reconstrucción de espacio de fase más importante es el método de retardo. Vectores en un espacio nuevo, el espacio de encaje, se forman valores de la serie de tiempo retrasados obteniendo la matriz de la Ec. 1.

$$S_n = (S_{n-(m-1)\tau}, S_{n-(m-2)\tau}, \dots, S_n) \quad (1)$$

$S_n$ - matriz reconstruida de la serie de datos,  $\tau$  tiempo de retardo,  $m$  dimensión de encaje.

### Tiempo de retardo

Para determinar un tiempo de retardo razonable, que es un valor entero adimensional que permite reconstruir la serie como matriz para ser representado en un espacio multidimensional, se usa el método de información mutua dada por Fraser y Swinney [20] en 1986. A diferencia de la función de autocorrelación [22], la información mutua tiene en cuenta también la función no lineal, calculada con la Ec. 2.

$$S_m = - \sum_{ij} p_{ij}(\tau) \ln \frac{p_{ij}(\tau)}{p_i p_j} \quad (2)$$

Donde:  $S_m$  función de información mutua,  $p_i$  es la probabilidad de encontrar un valor de la serie temporal en el intervalo-ésimo, y  $p_{ij}$  es la probabilidad conjunta de que una observación se encuentre en el  $i$ -ésimo intervalo y más tarde  $j$ -ésimo. En teoría, esta expresión puede calcularse fácilmente si el valor de retardo

$\tau$  encuentra un mínimo, el mismo es una buena opción para usarlo como tiempo de retardo, en general se asume el primer mínimo de la Ec. (2) como un valor aceptable del tiempo de retardo.

### Dimensión de encaje (Embedding)

El número  $m$  de elementos se denomina la dimensión de encaje, el teorema de Takens [21] establece que si  $\{S_n\}$  es la sucesión de mediciones de un sistema dinámico; entonces, la dimensión de encaje con tiempo de retardo adecuado, proporciona una imagen unívoca del conjunto original, si  $m$  es lo suficientemente grande.

La dimensión de encaje es muy utilizada, la aplicación es sencilla, si se dispone de mediciones escalares  $N$ , se construye un conjunto de vectores de encaje  $m$  con dimensión  $N - \tau(m-1)$ . Estos deben tenerse en cuenta para el cálculo de cantidades promedios en el espacio de las fases. Hay literatura sobre la elección de los parámetros  $m$  óptimos [20-22]. Se propone un método para determinar la mínima dimensión  $m$ , donde se acepta la dimensión cuando la función es cero [19].

La idea es que por cada punto en la serie de tiempo se busquen los vecinos más cercanos en el espacio  $m$ -dimensional.

Calculando la distancia  $\|\vec{s}_i - \vec{s}_j\|$  entre los puntos y calculando la razón dado en la Ec. 3 [21]:

$$R_i = \frac{\|\vec{s}_{i+1} - \vec{s}_{j+1}\|}{\|\vec{s}_i - \vec{s}_j\|} \quad (3)$$

Si  $R_i$  excede un valor umbral  $R_t$  este punto es llamado un falso vecino, el criterio es que la dimensión se acepta, cuando la fracción de los puntos, por  $R_i > R_t$  es lo suficientemente pequeña o cero.

### Dinámica de un sistema caótico.

El caos surge del crecimiento exponencial de las perturbaciones infinitesimales, para garantizar el análisis de esta inestabilidad están los exponentes de Lyapunov, que miden cuánto dos trayectorias se alejan, Ec. 4 [22].

$$\lambda_i = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{r_i(t)}{r} \right) \quad (4)$$

Con  $r_i(t)$  semieje mayor de una elipse,  $r$  radio pequeño inicial y  $t$  tiempo grande, en general se establece:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_d$$

Variables que permiten caracterizar un atractor, así:

- Para un punto fijo, todos los  $\lambda_i$  son negativos.
- En un ciclo límite,  $\lambda_{i=0}$  y  $\lambda_i < 0$  con  $i \lambda_i > 1$ .
- En un sistema caótico al menos un exponente de Lyapunov es positivo.

A partir de este resultado se puede definir, la entropía de Kolmogorov – Sinai, Ec. (5) [19].

$$h = \sum_{i=\#\lambda_i > 0} \lambda_i \quad (5)$$

O la dimensión de Kaplan – Yorke, 1979, Ec. (6) [18]

$$D_F = j + \frac{i-1}{|\lambda_{j+1}|} \sum_{i=1}^j \lambda_i \quad (6)$$

Con  $j$  - coeficientes positivos de Lyapunov.

### Predicción de la serie de tiempo usando la teoría del caos

Usando los parámetros determinados que caracterizan el espacio de las fases para un determinado valor de la serie de datos  $x(t)$ , es posible hacer modelos locales para describir la evolución desde una vecindad (con verdaderos vecinos) hacia otra vecindad de la órbita  $x(t+1)$  posterior. En este caso se ha usado la función Gaussiana, con puntos alrededor de los elegidos para reproducir los datos de la serie de tiempo. La varianza de la función Gaussiana se fija a la distancia media entre los centros. El modelo predice la serie de datos mediante la Ec. (7):

$$X_{n+1} = a_0 + \sum a_i f_i(x_n) \quad (7)$$

Donde  $x_n$  es el vector de  $n$ -ésimo retardo y  $f_i$  es una función gaussiana centrada en el punto  $i$ -ésimo y  $a$  constantes [22]. Lo cual se puede aplicar a los parámetros atmosféricos de ingreso del secador solar para predecir su comportamiento y simular en función del tiempo el funcionamiento del modelo propuesto.

### Modelado del secador

**Análisis del proceso de transferencia de calor en un colector de placa plana.**- Para realizar el análisis del intercambio de calor incidente y transmitida por el colector se considera la Ecuación de Balance Energético en colectores de placa plana, Duffie – Beckman Ec. (8). [12].

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{perd} + \frac{du}{dt} \quad (8)$$

(W): Es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo Ec.(9).

$Q_u$ (W): Es el calor que se trasfiere al fluido Ec. (10).

(W): Perdidas de calor (alrededores) por radiación, convección y conducción, Ec. (11).

$\frac{du}{dt}$  (W): Rapidez del cambio de energía almacenada en el colector, en este caso se considera  $\frac{du}{dt} = 0$ .

$$Q_{abs} = IA_c(\tau\alpha) \quad (9)$$

$I$  (W/m<sup>2</sup>): Es la radiación solar incidente.

$A_c$  m<sup>2</sup>): Es el área efectiva del colector.

$\tau$ : Transmitancia solar efectiva de la cubierta del colector

$\alpha$ : Absorbancia de la placa absorbente del colector.

$$Q_u = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

$m$  (kg): Masa de aire

$C_p$  (J/kg°C): Capacidad calorífica del aire.

$\frac{dT}{dt}$  (°C/s): Rapidez del cambio de cambio de temperatura del colector.

Las pérdidas de calor por se pueden expresar mediante la Ec. 11.

$$Q_{perd} = U_1 A_c (T_p - T_a) \quad (11)$$

$U_1$ (W/m<sup>2</sup>°C): Coeficiente de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción,  $T_a$ (°C) temperatura ambiente,  $T_p$ (°C) temperatura media de la placa.

Considerando las ecuaciones 8, 9, 10 y 11, tendremos Ec. (12):

$$mC_p \frac{dT}{dt} = A_c [E_a - U_1 (T_{pm} - T_a)] \quad (12)$$

Con Energía absorbida;  $= I A_c$ .

Para el cálculo de  $E_a$  y  $U_1$  se utiliza relaciones semiempíricas ajustadas a las condiciones de la zona.

El ángulo de inclinación óptimo de las superficies captadoras de un sistema solar está determinado por muchos factores que han sido considerados [7,12].

**Modelado de la cámara de secado.**- Las hipótesis bajo las cuales se ha realizado el modelo son: el agua extraída del producto se incorpora en forma de vapor saturado a la corriente de aire; los intercambios de radiación entre las paredes de la cámara y el producto se consideran despreciables; el agua del producto se supone que está en estado líquido y distribuida uniformemente en él; la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado se estima que coincide con la temperatura de salida del colector; la temperatura del aire situada entre las bandejas del producto se determina como media entre la temperatura de entrada y salida de la cámara, para la simulación del secado en modo mixto se considera exclusivamente la acción de la radiación en la bandeja inferior; que la superficie de las paredes interior y exterior son diferentes; por último, se considera las paredes opacas de la cabina de acero inoxidable con un aislante de fibra de vidrio, espesor de 5 cm.

Siguiendo la secuencia en los balances para la instalación genérica, particularizado para la disposición que nos ocupa, se establece las siguientes ecuaciones:

Intercambio entre el flujo de aire caliente, el producto y las paredes internas del secadero [11], Ec (13).

$$m_{as} \cdot cp_{as} \cdot (T_{as,e} - T_{as,s}) = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) + h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,med} - T_{p2}) + 2 \cdot h_{a,ip1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{as,e} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{a,ip2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{as,e} - T_{pi2}) \quad (13)$$

Siendo  $m_{as}$ : caudal másico de aire seco (kg/s);  $cp_{as}$ : calor específico del aire (J/kg °C);  $T_{as,e}$  y  $T_{as,s}$ : temperatura del agente desecante (aire) a la entrada y salida de la cámara de secado respectivamente (°C);  $T_{as,med}$ : temperatura del aire situado entre las dos bandejas del producto (°C);  $h_{a,p1}$  y  $h_{a,p2}$ : coeficientes convectivos aire-producto para la bandeja inferior y superior  $A_{p1}$  y  $A_{p2}$ : superficie de las bandejas inferior y superior que contienen al producto (m<sup>2</sup>);  $T_{p1}$  y  $T_{p2}$ : temperatura del producto húmedo de la bandeja inferior y superior respectivamente (°C);  $h_{a,ip1}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-pared traslucida (W/m<sup>2</sup>°C);  $S_{pi1}$ : superficie de una de las paredes traslucidas de la cámara (m<sup>2</sup>);  $T_{pi1}$ : temperatura de la pared interna traslucida (°C);  $h_{a,ip2}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo aire-pared opaca (W/m<sup>2</sup>°C);  $S_{pi2}$ : superficie de una de las paredes opacas de la cámara (m<sup>2</sup>);  $T_{pi2}$ : temperatura de la pared interna opaca (°C) y  $T_{as,med}$  la media de  $T_{as,e}$  y  $T_{as,s}$ .

El producto húmedo recibe energía del aire. Una parte es acumulada y otra se emplea en evaporar humedad, por tanto, se cumple en el equilibrio para la bandeja inferior y superior, así como entre las paredes, de los cuales se puede determinar sus respectivas temperaturas mediante balances de masa-energía.

$$m_{p1} \cdot cp_{p1} \cdot \left(\frac{dT_{p1}}{dt}\right) = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) + m_{ms1} \cdot L_v \cdot \left(\frac{dM_1}{dt}\right) \quad (14)$$

$$m_{p2} \cdot cp_{p2} \cdot \left(\frac{dT_{p2}}{dt}\right) = h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,e} - T_{p2}) + m_{ms2} \cdot L_v \cdot \left(\frac{dM_2}{dt}\right) \quad (15)$$

Con  $m_{p1}$  y  $m_{p2}$ : masa del producto húmedo de la bandeja inferior y superior (kg);  $cp_{p1}$  y  $cp_{p2}$ : calor específico del producto húmedo de la bandeja inferior y superior (J/kg°C);  $m_{ms1}$  y  $m_{ms2}$ : masa de la materia seca de la bandeja inferior y superior (kg);  $M_1$  y  $M_2$ : contenido de humedad en base seca del producto para bandeja inferior y superior respectivamente (kg/Kg<sub>db</sub>);  $L_v$ : calor latente de vaporización (KJ/kg).

$$M = M_0 e^{-(Bt+A)}$$

Con  $M_0$  contenido de humedad inicial de la planta y para la planta de manzanilla usada, los valores de  $B = -0,0179T + 0,2850$  y  $A = -0,067T + 0,1818$  caracterizadas a convección natural, llamados coeficientes de secado.

El intercambio de calor entre la superficie interna de la pared traslúcida y exterior se calcula utilizando la Ec. (16) y el intercambio de calor entre la superficie interna de la pared opaca y la exterior se determina empleando la Ec.(17):

$$m_{pi1} \cdot cp_{pi1} \cdot \left(\frac{dT_{pi1}}{dt}\right) = 2 \cdot k_{pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{pe1} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{a,pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{as,e} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{med,pe1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_a - T_{pe1}) + h_r \cdot S_{pe1} \cdot (T_r - T_{pe1}) \quad (16)$$

$$m_{pi2} \cdot cp_{pi2} \cdot \left(\frac{dT_{pi2}}{dt}\right) = 2 \cdot k_{pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{pe2} - T_{pi2}) + 2 \cdot h_{a,pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{as,e} - T_{pi2}) + 2 \cdot h_{med,pe2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_a - T_{pe2}) \quad (17)$$

Siendo  $m_{pi1}$  y  $m_{pi2}$ : masa de la pared traslúcida y opaca de la cámara de secado (kg);  $cp_{pi1}$  y  $cp_{pi2}$ : calor específico de la pared interior traslúcida y opaca (J/kg°C);  $k_{pi1}$  y  $k_{pi2}$ : coeficiente por intercambio de conducción de la pared interior traslúcida y opaca (W/m²°C);  $T_{pe1}$  y  $T_{pe2}$ : temperatura de la pared exterior traslúcida y opaca (°C);  $h_{med,pe1}$  y  $h_{med,pe2}$ : coeficiente de transmisión de calor convectivo medio-pared exterior (W/m²°C);  $S_{pi1}$  y  $S_{pi2}$ : superficie de la pared exterior traslúcida y opaca, respectivamente (m²);  $T_a$ : temperatura ambiente (°C);  $h_r$ : coeficiente de intercambio por radiación (W/m²°C);  $T_r$ : temperatura media radiante del exterior (°C).

Estas últimas variables se encuentran relacionadas mediante la Ec.(18):

$$h_r = \varepsilon_{p1} \cdot \sigma \cdot (T_{p01} + T_r^2) (T_{pe1} + T_r) \quad (18)$$

Donde  $\varepsilon_{p1}$  es la emisividad del producto de la bandeja inferior y  $T_r$  se puede obtener mediante la relación de Swinbank [7].

$$T_r = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

**Modelo en Visual Basic.-** Para facilitar los cálculos el modelo se desarrolla en Visual Basic, el cual consta de dos cuerpos, uno para los cálculos en el colector solar y otro para cálculos en la cámara de secado, conectados entre sí, Fig 1.

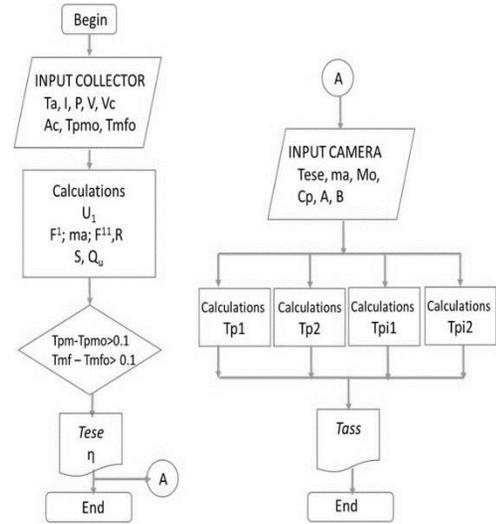


Fig. 1. Diagrama de flujo del modelo secador.

Con parámetros de entrada: Temperatura ambiente, Radiación incidente, Presión atmosférica, velocidad del viento, velocidad del aire en el colector, área del colector, masa del producto y ratio de secado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con uso del prototipo, construido en acero inoxidable con aislante de fibra de vidrio de 5 cm, consta del colector solar, la cámara de secado y una chimenea de evacuación, Fig. 2, en el cual se han instalado sensores de carga, temperatura, humedad y velocidad [10], además se usa datos de la estación meteorológica montada en el lugar de experimentación (Estación meteorológica de la UNACH):



Fig.2. Prototipo de secador solar.

Los resultados obtenidos, para la reconstrucción del espacio de las fases y la dinámica de los sistemas, usando la teoría del caos se presentan en la Tabla 1 y Fig 3:

Tabla 1. Tiempo de retardo y dimensión de encaje de los parámetros meteorológicos.

Parámetro	Tiempo de retardo	Dimensión de encaje
Temperatura	6	5
Humedad	7	6
Velocidad del viento.	6	7
Radiación solar	4	6
Presión	6	6

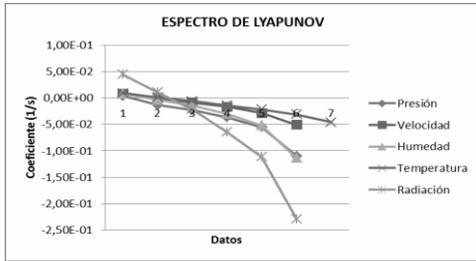


Fig.3 Espectro de Lyapunov de las variables meteorológicas.

Tabla 2. Dimensión Fractal y entropía del sistema de los parámetros meteorológicos.

Parámetros meteorológicos	Dimensión fractal de Kaplan-Yorke	Entropía del sistema
Radiación Solar	3,514476	0,0553207
Temperatura	3,265099	0,0100029
Humedad	2,289249	0,0081889
Velocidad del Viento	2,878674	0,0078693
Presión	1,258936	0,0034824

Los resultados de la Tabla 2 se usan para realiza la predicción de los parámetros meteorológicos de ingreso en el modelo, luego se compara con los datos reales en un período de 24 horas Figs. 4-8, usando los datos necesarios.



Fig.4. Gráfico de comparación entre datos reales y predichos usando la teoría del caos de temperatura.

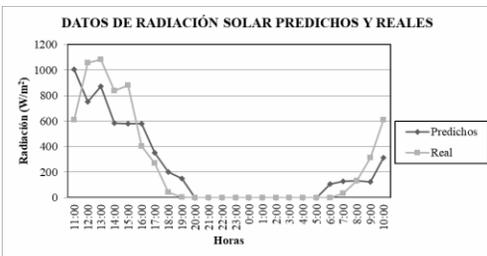


Fig.5. Gráfico de comparación entre datos reales y predichos usando la teoría del caos de radiación solar.



Fig.6. Gráfico de comparación entre datos reales y predichos usando la teoría del caos de velocidad del viento.

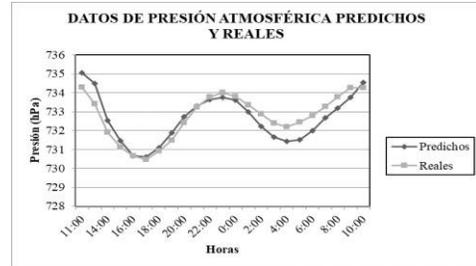


Fig.7 Gráfico de comparación entre datos reales y predichos usando la teoría del caos de temperatura.

Tabla 3. Correlación de datos meteorológicos reales y predichos, aplicando el método Bootstrap.

Parámetros meteorológicos	Coefficiente de Pearson	Intervalo de confianza
Radiación Solar	0,89	-232,75   180,75
Temperatura	0,95	-1,79   1,52
Humedad	0,97	-9,49   8,20
Velocidad del Viento	0,92	-0,58   1,15
Presión	0,89	-0,82   0,61

El análisis de las series de datos predichos y reales se aplica el método Bootstrap de remuestreo al 95 % de confiabilidad a mil repeticiones, por no ser todas las series normales, de cuyos resultados se puede decir que las diferentes series no presentan diferencias significativas al 0,05 de nivel de significancia ya que contienen al cero en sus intervalos de confianza, a pesar que a ciertas horas se pueden notar mayores variaciones especialmente en parámetros como la radiación incidente y la velocidad del viento, Fig.5 y Fig. 6.

Con los resultados anteriores se simula, en primera instancia el colector solar y posteriormente en la cámara de secado, usando como prueba planta de manzanilla, de la cual previamente se determina el ratio de secado necesario para el modelado, además se supone conocida la velocidad en el colector.

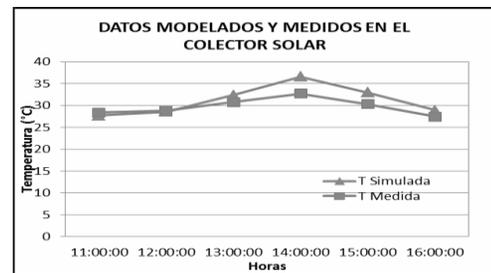


Fig. 8. Comparación de medidas realizadas en el colector solar (T Medida) y calculadas con el modelo desarrollado.

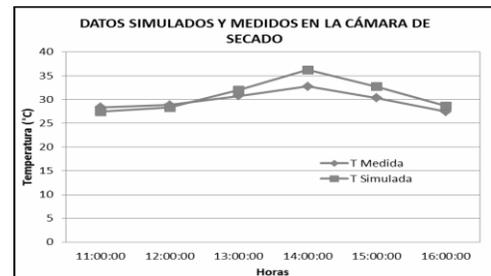


Fig. 9. Comparación de medidas realizadas en la cámara de secado (T Medida) y calculadas con el modelo desarrollado.

Para el análisis estadístico de las series de datos del colector y la cámara calculados y medidos se aplica el método t-Student, Tabla 4, dado que las series son normales, cuyos resultados se prueban al 95 % de confianza, cumpliéndose en cada caso que las series no presentan diferencias significativas.

Tabla 4. Prueba t-Student para medias de dos muestras emparejadas a dos colas de la temperatura de salida.

	Colector	Cámara
Coefficiente de correlación de Pearson	0,949	0,955
Estadístico t	-0,3102	1,443
P(T<=t) dos colas	0,769	0,209
Valor crítico de t (dos colas)	2,571	2,571

#### 4. CONCLUSIONES

- El modelo de simulación diseñado permite simular el funcionamiento del secador de Placas Planas.
- La teoría de caos permite calcular los parámetros de ingreso para la simulación predictiva del modelo diseñado.
- El modelo se adapta a las condiciones ambientales de la zona.
- Los resultados alcanzados tanto en la cámara de secado como en el colector solar, no presenta diferencias significativas al 95 % de precisión, al comparar los datos simulados con los medidos en el prototipo experimental.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Al grupo de Energía y Ambiente de la ESPOCH, por su contribución con los datos meteorológicos, a la UNACH, por los datos proporcionados por el proyecto “Diseño de un secador solar bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba”.

#### 6. REFERENCIAS

[1]. Pareja, M.A. Radiación solar y su aprovechamiento energético, Edi. Marcombo S.A., Barcelona España, 2010.

[2]. Schallenberg J.C., y otros, “Energías renovables y eficiencia energética”, Instituto Tecnológico de Canarias S.A., España, 2008.

[3]. García L. y otros, “Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales”, Revista. AVANCES Investigación en Ingeniería Vol. 9 - No. 2, pp. 9-19, 2012.

[4]. Curzel H. y otros, “Secado solar, valor agregado para pequeños productores de Orégano en el Alto Valle de Río Negro, Argentina”, Revista Iberoamericana de Tecnología pp. 23-30, Postcosecha, 2014.

[5]. El-Sebaia A., Shalaby M., “Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint, Energy Conversion and Management, Volume 74, pp. 109–116, October, 2013.

[6]. Bayona C., Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas, Tesis Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2011.

[7]. Montero I., Modelo y construcción de un secador solar híbrido para residuos biomásicos, Universidad de Extremadura, Tesis de Doctorado, España, 2005.

[8]. Muñoz J., Perspectivas de las energías renovables en el Ecuador, Ed. Universidad Nacional de Loja, Ecuador, 2013.

[9]. Plaza X. y Yangue W., “Diseño e implementación de una secadora hibrida para el control y monitoreo del proceso de secado de cacao”, Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2012.

[10]. Haro A. y otros, “Modelado de un colector solar de placas planas en el altiplano ecuatoriano”, Dyna Energía y Sostenibilidad, pp. 1-15, 2015.

[11]. Rojas M.F., Determinación de un modelo de ratio de secado en manzana y manzanilla para lograr la eficiencia de secado del producto en la provincia de Chimborazo, Tesis de pregrado, UNACH, Ecuador, 2014.

[12]. Duffie J. y otros, Solar Engineering of Thermal Processes, Ed. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, USA, 2013.

[13]. Shalaby S.M. y otros, “Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, Pages 110–116, May 2014.

[14]. Haro A. y otros. "Modelo predictivo del funcionamiento de un secador solar usando la teoría del caos" DYNA Energía y Sostenibilidad. pp. 1-16, 2016.

[15]. Haro A. y otros, “Characterization of the atmospheric dynamics in Riobamba city using de chaos theory”, Atmospheric and Climate Sciences, Vol.5 No.4, pp. 441-449, October, 2015.

[16]. Kantz H. and Schreiber T., Nonlinear Time Series Analysis, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 2004.

[17]. Haro A. y otros “Predicción de datos meteorológicos en cortos intervalos de tiempo en la ciudad de Riobamba usando la teoría del caos”, Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática ISSN: 1690-8627, pp. 35-4, 2016.

[18]. Ruelle D., “Early chaos theory”, Physics Today, pp. 27, May, 2013.

[19]. Taher A. zar and Vaidyanathan S., Advances in Chaos Theory and Intelligent Control, Springer International Publishing Switzerland 2016.

[20]. Kugiumtzis D. “State Space Reconstruction Parameters in the Analysis of Chaotic Time Series - the Role of the Time Window Length”, Department of Informatics, University of Oslo, P.O.Box 1080 Blindern, N-0316 Oslo, Norway, Physica D, 1996.

[21]. Kennel M.B., Brown R., and Abarbanel H.D.I., Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, Phys. Rev. A 45, pp. 3403, 1992.

[22]. Hegger R., “Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package”, arXiv: Chao-dyn/981005v1, pp. 1-27, 1998.