

# Simulación de la dinámica de un secador solar usando la teoría del caos

Arquímedes Haro Velasteguí<sup>1</sup>, Yolanda Llosas Albuérne<sup>2</sup>, María I Fernández<sup>3</sup>,

1. Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH, Riobamba, Ecuador

2. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Ave Urbina y Ché Guevara, Portoviejo.

(593-5)2632677 [yllosas@utm.edu.ec](mailto:yllosas@utm.edu.ec)

3. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

**Abstract—** The simulation is a technique that represents a system, It allows to diagnose its operation, help establish its behavior and control their possible variations, why has become a very important tool in technology development, saving money, time and work. Despite the advantages, there are systems that are extremely difficult to simulate, since its complexity and unpredictability in time is very large, especially those associated with environmental conditions as in the case of solar drying is subject to variables weather, although it is designed properly functioning models regarding the efficiency obtained, but little has been done to improve it, given the development of alternative technologies or applications that have been given to it. In this framework and in order to contribute to the improvement of this type of technology that can be easily adopted by developing countries, with which they can make much better use their natural resources and knowledge, without major technological investment and high degree of accuracy, the present investigation is proposed to apply the Chaos Theory applies as operating base of a solar drying model in conditions of the Ecuadorian Highlands

**Index Terms—** Secador solar, modelo matemático, teoría del caos, modelo de simulación, energía solar, altiplano Ecuatoriano.

## I. INTRODUCCION

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema y realizar experimentos, con la finalidad de comprender su comportamiento o evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por ciertas condiciones para describir el funcionamiento del sistema. En la actualidad la simulación ha alcanzado una gran importancia en los diferentes campos de la ciencia, industria e incluso el entretenimiento, lo que ha conllevado que crezca rápidamente, impulsado, particularmente con el desarrollo de las computadoras, que han aportado en gran medida en su expansión.

La teoría del caos es una rama de la ciencia que actualmente se usa para estudiar sistemas muy sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales, conocidos como caóticos, en los cuales pequeñas variaciones en dichas condiciones iniciales pueden implicar grandes diferencias en el comportamiento futuro, imposibilitando la predicción a largo plazo. Esto sucede a pesar que esos sistemas son en rigor determinísticos, es decir; su comportamiento puede ser completamente determinado conociendo sus condiciones iniciales [2,3].

Los datos meteorológicos son muy sensibles a los cambios en las variables iniciales, lo que le hace un sistema apropiado para

trabajarlo con la matemática caótica. La precisión de las predicciones meteorológicas es relativa, y los porcentajes anunciados tienen poco significado sin una descripción detallada de los criterios empleados para juzgar la exactitud de una predicción [1]. Los modelos numéricos estudiados en la teoría del caos han introducido considerables mejoras en la exactitud de las previsiones meteorológicas en comparación con las predicciones anteriores, realizadas por medio de métodos subjetivos, en especial para periodos superiores a un día. En estos días es posible demostrar la confiabilidad de las predicciones específicas para periodos de hasta cinco días gracias a la densidad entre las órbitas periódicas del sistema, y se han logrado algunos éxitos en la predicción de variaciones anormales de algunas variables para periodos de hasta 30 días [2].

Estos resultados permiten con certeza realizar múltiples aplicaciones como la que se presentan a continuación en el proceso de secado de un secador solar, dado que el mismo dependiendo del producto a secar puede darse en cortos intervalos de tiempo, que aplicando este método podrá simularse con bastante precisión, si bien es cierto, existen otros métodos estadísticos que se han aplicado con mayor sencillez [3], la propuesta hecha con la teoría del caos mejorará la simulación y no requeriría de equipos sofisticados para determinar los datos meteorológicos necesarios para simular el sistema. Es por ello que el problema presentado es la necesidad de una simulación efectiva para poder determinar los datos meteorológicos para el trabajo del secador solar en las condiciones específicas de la ciudad de Riobamba

El modelado del secado se da en base a balances de energía y masa [4], que permiten simular los procesos internos del secado, para lo cual como objetivo se propone el diseño de un modelo simplificado desarrollado en simulink para el tratamiento de los datos meteorológicos.

Como objeto del estudio, se desarrolla en la ciudad de Riobamba y tiene como finalidad simular el proceso de secado bajo condiciones físicas y meteorológicas típicas de la zona donde se halla (Latitud: 1° 39' 58" S Longitud: 78° 39' 33" O. Altura respecto al nivel del mar 2750 m.), caracterizado por su posición, en la zona Ecuatorial, altura respecto al nivel del mar y relieve irregular del altiplano Ecuatoriano, presenta condiciones particulares donde se adaptaría adecuadamente el

modelo propuesto, el cual sin embargo se puede generalizar a otras zonas.

Para el desarrollo del trabajo, básicamente se usa el modelo Tisian y el Simulink de Matlab, los cuales se complementan con datos meteorológicos tomados de la estación meteorológica de la Universidad Nacional de Chimborazo y se ajustan a los datos del prototipo del proyecto “Diseño de un secador solar multiuso bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba” [5]

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Teoría del caos

En el desarrollo de la teoría del caos se dio hacia finales del siglo XIX, cuando el físico-matemático Henri Poincaré introdujo el concepto de no linealidad, que contradecía el ideal clásico de los sistemas lineales en los que causa y efecto se identifican plenamente, y la resultante de un fenómeno es igual a la suma de sus partes. La no linealidad implica divergencia entre resultado y origen, y la simple adición de las partes de un hecho no corresponde al producto final, por lo que los algoritmos lineales poco pueden hacer para explicar su dinámica. El problema no era menor, si se considera que un 90% de los procesos de la naturaleza son de carácter no lineal [6].

El meteorólogo Edward Lorenz, sin proponérselo, dio en 1960 el segundo paso en el avance de la teoría del caos. Al estar realizando un día simulaciones a partir del comportamiento de los parámetros meteorológicos elementales, copió por error los números de la impresión anterior de sus registros y los introdujo en la computadora; observó que el resultado de las condiciones atmosféricas, a escaso tiempo del punto de partida, divergía parcialmente del obtenido con anterioridad, pero al cabo de pocos meses –ficticios, puesto que eran simulaciones– las pautas perdían la semejanza por completo. Lorenz descubrió que el problema se hallaba en los decimales: el programa guardaba seis, pero para ahorrar espacio él sólo había introducido tres, convencido de que el resultado apenas se resentiría (Lorenz, 1963).

Para la aplicación de la teoría del caos se sigue un procedimiento que va desde la reconstrucción de las series de datos al espacio de las fases, la determinación del grado de casticidad que tiene el sistema y llegando a la predicción de dichos sistemas.

**Atractor:** Es una representación dinámica de un sistema en el espacio de las fases. Una vasta clase de sistemas dinámicos disipativos, tienen la notable propiedad de poseer un atractor, el cual es el lugar de los puntos recorridos luego de una trayectoria suficientemente larga. En el caso de los sistemas caóticos, en las cuales se tiene una fuerte dependencia de las coordenadas iniciales, el atractor no es en efecto un objeto regular, sino más bien tiene una estructura muy complicada, entonces se lo llama

atractor extraño (Rulle), el cual puede tener una estructura fractal [7,8].

**Coordenada de retardo:** 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 mismo no representa adecuadamente el espacio de fase (multidimensional) de los sistemas dinámicos, uno tiene que emplear alguna técnica para determinar la estructura multidimensional utilizando los datos disponibles [9]. 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 tiempo retrasado de las mediciones escalares, a partir de:

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

$S_n$  matriz reconstruida de la serie de datos

**Dimensión de encaje (Embedding):** El número  $m$  de elementos se denomina la dimensión de encaje, el tiempo  $\tau$  generalmente se refiere al retraso. El conocido teoremas Takens [5] y Sauer et al. [6] Establece que si la sucesión  $\{S_n\}$  de mediciones escalares del estado de un sistema dinámico, entonces bajo ciertas circunstancias, la dimensión de encaje con tiempo de retardo adecuada, proporciona una imagen unívoca del conjunto original  $\{x\}$ , si  $m$  es lo suficientemente grande. La dimensión de encaje se utiliza en casi todos los métodos que se describe [4]. La aplicación es sencilla y no requiere más explicación. Si se dispone de mediciones escalares  $N$ , el número de vectores de encaje es  $N - \tau(m-1)$ . Esto debe tenerse en cuenta para la correcta normalización de cantidades promedio. Hay una amplia literatura sobre la elección de los parámetros  $m$  y  $\tau$  empotrar «óptima». Estos resultados proporcionan el software aplicado. Se propone un método para determinar la mínima dimensión  $m$  (Kennel et al) [7].

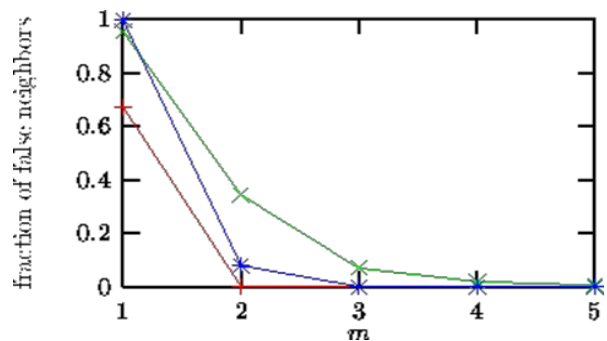


Fig. 1 Determinación de tiempo dimensión de encaje con método de falsos vecinos.

La introducción del concepto de los falsos vecinos y otros instrumentos ad hoc fue en parte una reacción a la conclusión que muchos resultados obtenidos para los genuinos invariantes, como la dimensión de correlación ha sido espurios debido al procedimiento de estimación. En este último caso, correlación serial y muestra pequeñas fluctuaciones pueden confundir fácilmente determinismo no lineal. Resulta, sin embargo, que las cantidades ad hoc básicamente sufren los mismos problemas

que pueden ser causado por las mismas precauciones. Por lo tanto, la aplicación de falsos vecinos permite especificar una mínima separación temporal de vecinos válidos.

Exponentes de Lyapunov: El caos surge del crecimiento exponencial de las perturbaciones infinitesimales, para garantizar el análisis de esta inestabilidad están los exponentes de Lyapunov, que cuantifican cuando dos trayectorias se alejan Ec. (1).

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{r(t)}{r_0} \right) \quad (1)$$

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

Variables que permiten caracterizar un atractor, así:

- a) Para un punto fijo todos los son negativos.
- b) En un ciclo límite
- c) En el movimiento de un toro  $n$  dimensional,
- d) En un sistema caótico al menos un exponente de Lyapunov es negativo.

Entropía de Kolmogórov-Sinai: se define como principio que mide la pérdida de información a lo largo de la evolución del sistema Ec. (8). También es definida como la suma de exponentes positivos de Lyapunov.

Tiene una gran importancia, en su principal aplicación a sistemas de los cuales no se dispone más que de series temporales de valores de determinada variable, la cual se considera poseedora de significado.

$$h = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \lambda_i \quad (2)$$

Dimensión de Kaplan-Yorke: es un método para determinar la dimensión de un atractor, usando exponentes de Liapunov Ec. (9). Mediante la disposición de los exponentes de Lyapunov en orden de mayor a menor  $i$  representa el índice, para el qué, la dimensión del atractor se puede determinar como sigue:

$$D_F = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|}$$

$$\sum_{i=1}^j \lambda_i < 0 \quad (3)$$

Con  $j$  coeficientes positivos de Lyapunov [10].

Predicción de la serie de tiempo: Usando lo que se sabe de las coordenadas global y local de la dinámica, y trabajando en el espacio determinado por  $y(t)$ , es posible hacer modelos locales para describir la evolución desde una vecindad (con verdaderos

vecinos) hacia otra vecindad de la órbita  $y(t+1)$ . En este caso se ha usado funciones Gaussianas, con puntos alrededor de los elegidos para reproducir los datos de la serie de tiempo. La varianza de Gaussianas se fija a la distancia media entre los centros [11]. El modelo predice la serie de datos mediante la siguiente relación:

$$X_{n+1} = a_0 + \sum a_i f_i(x_n) \quad (4)$$

Donde  $x$  es el vector de  $n$ -ésimo retardo y  $f_i$  es una función gaussiana centrada en el punto  $i$ -ésimo y a constantes [5].

Métodos de control: Explota las propias técnicas de reconstrucción del espacio de fases se basan en el control de los parámetros del sistema agregándole nuevos grados dinámicos de libertad al mismo. En general el truco consiste en que al hacer esto se lleve la dinámica desde estructuras inestables a estructuras estables, para mejorar estos procedimientos se aplica una reducción del ruido inicial en los datos.

#### Modelado del secador

Análisis del proceso de transferencia de calor en un colector de placa plana

Ecuación de Balance Energético en colectores de placa plana Ec. 5.

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{perd} + \frac{du}{dt} \quad (5)$$

$Q_{abs}$  (W): Es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo Ec. 5

$Q_u$  (W): Es el calor que se trasfiere al fluido Ec. (6).

$Q_{perd}$  (W): Pérdidas de calor (alrededores) por radiación, convección y conducción, Ec. 7.

$du/dt$  (W): Rapidez del cambio de energía almacenada en el colector, normalmente despreciable  $du/dt=0$ .

$$Q_{abs} = I A_c (\tau \alpha) \quad (5a)$$

$I$  ( $W/m^2$ ): Es la radiación solar incidente.

$A_c$  ( $m^2$ ): Es el área efectiva del colector.

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

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

$$Q_u = m_a C_p \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

$m_a$  (kg): Masa de aire

$C_p$  ( $J/kg^\circ C$ ): Capacidad calorífica del fluido

$dT/dt$  ( $^\circ C/s$ ): Rapidez del cambio de temperatura con respecto al tiempo

$$Q_{perd} = U_1 A_c (T_p - T_a) \quad (7)$$

$U_1$  ( $W/(m^2^\circ C)$ ): Coeficiente de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción,  $T_a$  ( $^\circ C$ ) temperatura ambiente,  $T_p$  ( $^\circ C$ ) temperatura media de la temperatura media

de la placa, la cual es función del diseño del colector, y a su vez, éste depende de la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector.

Considerando las ecuaciones anteriores, tendremos:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = A_c [E_a - U_l (T_{pm} - T_a)] \quad (8)$$

Con  $E_a$  energía absorbida;  $E_a = I(\tau\alpha)$ .

Para el cálculo de  $E_a$  y  $U_l$  se utiliza relaciones semiempíricas ajustadas a las condiciones de la zona [1].

Inclinación de colector solar

El ángulo de inclinación óptimo de las superficies captadoras de un sistema solar está determinado por muchos factores, entre ellos la radiación incidente en el lugar donde va situada la instalación, y el cielo solar, donde influye la sombra de objetos que no pueden ser eliminados, como edificios (M. Pareja 2012), montañas, etc.

La ubicación del colector en nuestro caso (hemisferio sur) debería estar hacia el norte con una inclinación similar a la latitud para que los rayos del sol incidan perpendicularmente a la superficie y se tenga mejor aprovechamiento, pero por cuestiones de limpieza (para que el polvo que se acumula en la superficie tienda a resbalar, la lluvia no se acumule o la lluvia sea la encargada de limpiar por si sola la superficie) se les puede dar una inclinación de  $\pm 10^\circ$  sin que esto afecte sensiblemente su funcionamiento (C.L Hii, 2012).

Modelado de la cámara de secado

Las hipótesis bajo las cuales se ha realizado el modelo son las siguientes: 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 por la disposición de las bandejas, 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:

1) *Intercambio entre el flujo de aire caliente, el producto y las paredes internas del secadero, Ec 10*

$$\begin{aligned} m_{as} \cdot c_{p,as} (T_{as,e} - T_{as,s}) \\ = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) + h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,med} - T_{p2}) \\ + 2 \cdot h_{a,pi1} \cdot S_{pi1} \cdot (T_{as,e} - T_{pi1}) + 2 \cdot h_{a,pi2} \cdot S_{pi2} \cdot (T_{as,e} - T_{pi2}) \end{aligned}$$

Siendo  $m_{as}$ : caudal másico de aire seco (kg/s);  $[c_p]_{as}$ : 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 (W/m<sup>2</sup>°C);  $A_{p1}$  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);  $h_{(a,pi2)}$ : 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).

$$T_{as,med} = \frac{T_{as,e} - T_{as,s}}{2} \quad (10)$$

2) 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 las ecuaciones.

$$m_{p1} \cdot c_{p,p1} \cdot \left( \frac{dT_{p1}}{dt} \right) = h_{a,p1} \cdot A_{p1} \cdot (T_{as,e} - T_{p1}) + m_{ms1} \cdot L_v \cdot \left( \frac{dM_1}{dt} \right) \quad (11)$$

$$m_{p2} \cdot c_{p,p2} \cdot \left( \frac{dT_{p2}}{dt} \right) = h_{a,p2} \cdot A_{p2} \cdot (T_{as,e} - T_{p2}) + m_{ms2} \cdot L_v \cdot \left( \frac{dM_2}{dt} \right) \quad (12)$$

Con  $m_{p1}$  y  $m_{p2}$ : masa del producto húmedo de la bandeja inferior y superior (kg);  $[c_p]_{p1}$  y  $[c_p]_{p2}$ : 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/kgdb);  $L_v$ : calor latente de vaporización (J/kg).

$$M = M_0 e^{-(Bt+A)} \quad (13)$$

Caracterizado para la planta de manzanilla de la zona usada en la prueba

$$A = 0,0018T_2 - 0,1858T + 4,6467 \quad (14)$$

$$B = -0,0231T + 0,5334 \quad (15)$$

Con  $M_0$  contenido de humedad inicial de la planta.

3) El intercambio entre la superficie interna de la pared traslucida y exterior se da en la ecuación (16) y el intercambio

entre la superficie interna de la pared opaca y la exterior en la expresión (16)

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

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

Siendo  $m_{pi1}$  y  $m_{pi2}$ : masa de la pared traslúcida y opaca de la cámara de secado (kg);  $c_{pi1}$  y  $c_{pi2}$ : 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 expresión:

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

Donde es la emisividad del producto de la bandeja inferior y se puede obtener mediante la relación de Swinbank [19]

$$T_r = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (19)$$

### Funciones de transferencia del sistema.

Aplicando las transformadas de Laplace a la ecuación 14, se obtiene las funciones de transferencia a ser simuladas en Simulink de Matlab, con parámetros de entrada del modelo Tisian que usa la teoría del caos para regular los parámetros de entrada y salida

### Modelo en Simulink

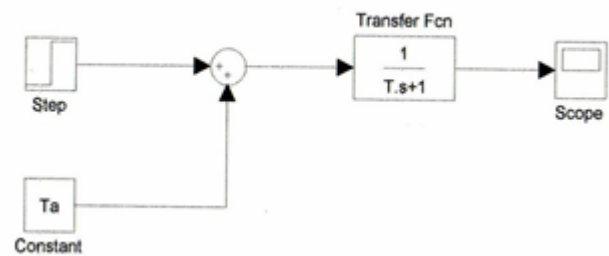


Fig. 2. Modelo de la pared opaca de la cámara de secado.

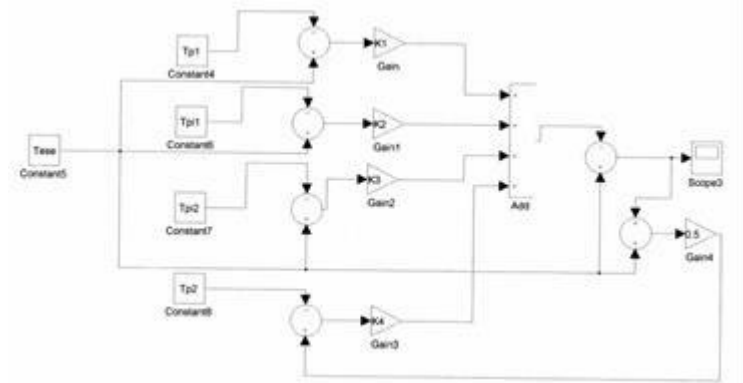


Figura 3. Modelo general de la cámara de secado

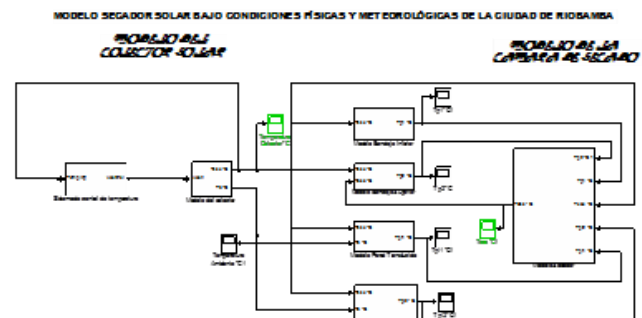


Figura 4. Modelo de bloques general del secador.

## III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con uso del prototipo, en el cual se han instalado sensores de carga, temperatura, humedad y velocidad se ha procedido a verificar los resultados del modelo desarrollado, en primera instancia se realiza un análisis de la dinámica atmosférica usando la teoría del caos, empleando datos de la estación meteorológica montada en el lugar de experimentación:





Fig.5. Prototipo de secador solar.

Obteniéndose los siguientes resultados:

a) Dinámica atmosférica usando la teoría del caos usando modelo Tisian:

Tabla 1. Tiempo de retardo (delay time) y dimensión de encaje (ebeding dimation) con reducción del ruido.

PARAMETER	TIEMPO DE RETARDO	DIMENSIÓN DE ENCAJE (EBEDDING DIMENTION)
Temperatura	7	9
Humedad	7	10
Velocidad del viento.	7	8
Radiación solar	6	17
Pressure	5	6

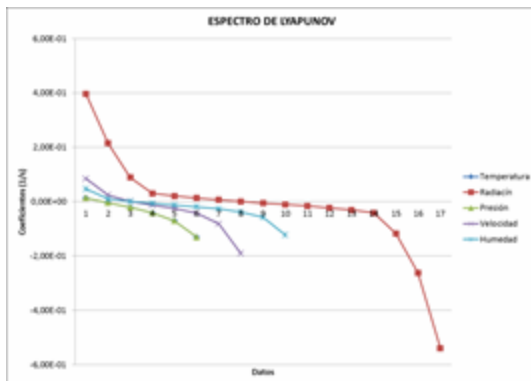


Fig.6 Espectro de Lyapunov de las variables meteorológicas analizadas.

Con los resultados obtenidos se realiza la predicción del sistema para los diferentes datos meteorológicos que sirven de ingreso para el modelo y que permitirán simular el sistema, se ha hecho una comparación con los datos reales para ver la precisión de la misma, que para el caso presente se lo ha realizado para 24 horas, sin embargo se usarán solamente los necesarios de acuerdo al producto a secar, cabe señalar que se verifico que mientras mayor es el tiempo de predicción menos precisa es.

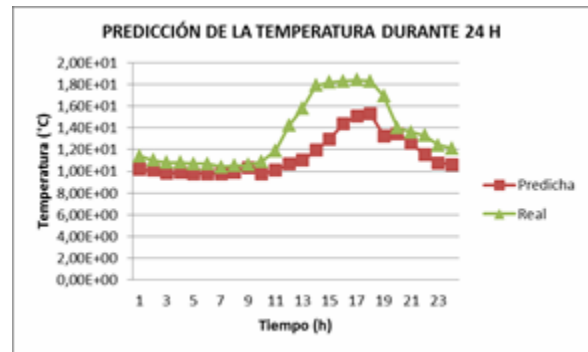


Fig.7. Gráfico de comparación entre datos reales y predictores de la temperatura ambiente durante 24 horas.

Tabla 2. Correlación de los datos reales y la predicción de la temperatura.

	Real	Pred24
Real	1	
Pred24	0,88	1

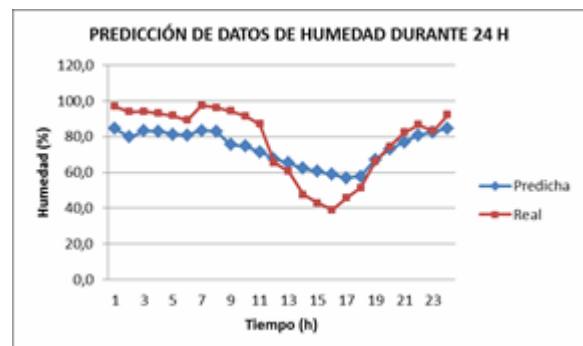


Fig. 8. Gráfico de comparación entre datos reales y predictores de la humedad durante 24 horas.

Tabla 3. Correlación de los datos reales y previstos de la humedad.

	<i>Predicha</i>	<i>Real</i>
Predicha	1	
Real	0,94153329	1

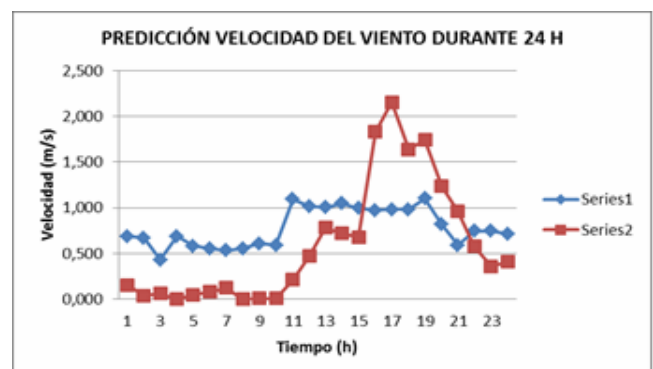


Fig.9. Comparación entre datos reales y predictores de la

velocidad del viento durante 24 horas.

Tabla 4. Correlación de los datos reales y previstos de la velocidad del viento.

	<i>Predicha</i>	<i>Real</i>
Predicha	1	
Real	0,64890233	1

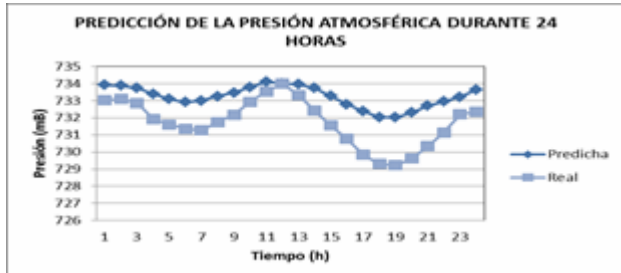


Fig. 10. Comparación entre datos reales y predictores de presión durante 24 horas.

Tabla 5. Correlación de los datos reales y previstos de la presión atmosférica

	<i>Predicha</i>	<i>Real</i>
Predicha	1	
Real	0,98667847	1

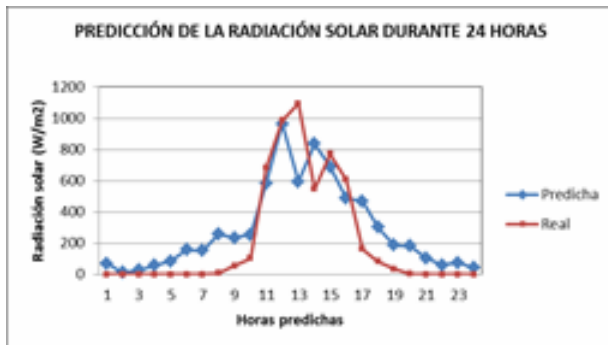


Fig. 11. Comparación entre datos reales y predichos de la radiación solar predicha durante 24 horas.

Tabla 6. Correlación de los datos de radiación solar real y prevista.

	<i>Predicha</i>	<i>Real</i>
Predicha	1	
Real	0,88791045	1

Tabla 7. Prueba de hipótesis con la distribución t-Student a dos colas con nivel de significación de 0,05 a dos colas (t teórica entre 2,0687)

PARAMETRO	t-Student
Temperatura	2,6004E-06
Humedad	0,12591653
Velocidad del Viento	0,11685691
Presión	1,07319E-09
Radiación Solar	0,0414249

Los datos son estadísticamente iguales al 95 % de precisión y teniendo en cuenta los resultados vistos anteriormente se puede decir que tienen el mismo comportamiento. Con estos resultados anteriores se simula el secador solar, primero el colector y luego la cámara, usando como prueba planta de manzanilla:

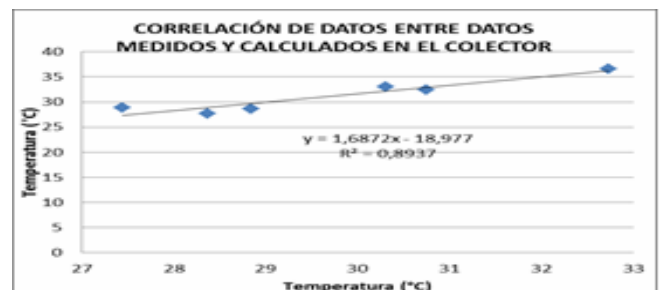
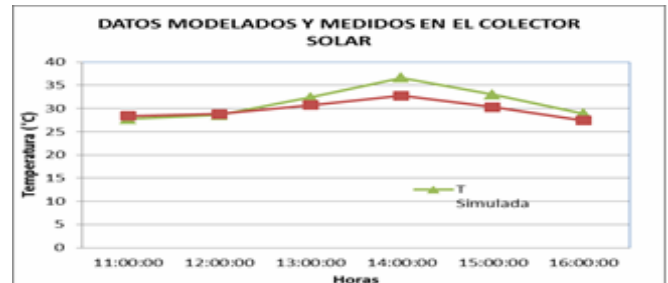


Fig. 12. a) Comparación de medidas realizadas en el prototipo (T Medida) y calculadas en el modelo desarrollado en el colector solar (T Simulada), b) y su correlación

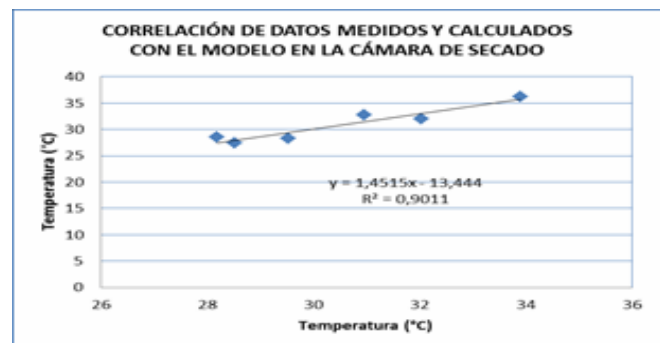
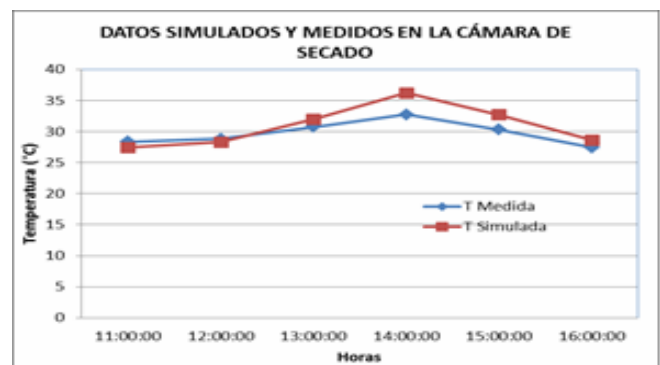


Fig. 14. a) Comparación de medidas realizadas en el prototipo (T medida) y calculadas en el modelo desarrollado en la cámara de secado (T Simulada), b) y su correlación.

## IV. CONCLUSIONES

A. En el trabajo se presenta un método, que estadísticamente se verifica, podría simular el proceso de el secado usando la teoría del caos con alto grado de precisión, hecho que ayudaría a planificar y controlar el proceso de secado solar en diferentes condiciones, así como, el diseño del secador para obtener las condiciones óptimas para que se realice el secado en forma adecuada.

B. •El modelo realiza varias simplificaciones para facilitar la descripción del proceso, sin embargo, en comparación con otros resultados que se usan métodos con mayor complejidad los resultados son equiparables, con la gran ventaja de que se podrían simular las condiciones dinámicas de la atmósfera adicionalmente usando datos de fácil acceso.

C. •La modelación no requiere de métodos matemáticos complejos y el software necesario que facilita el proceso ya está desarrollado.

D. • Los resultados del modelo se adaptan básicamente a las condiciones de la ciudad de Riobamba, sin embargo se puede extender hacia otras zonas realizando un proceso similar, considerando las condiciones de las zonas donde se va a aplicar.

E. • Una vez más queda demostrado que la teoría del caos es la más idónea para este tipo de sistemas complejos, que con el desarrollo que se tiene en la actualidad en el campo de la informática, es factible aplicarle incluso en países que no tienen gran desarrollo tecnológico.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] Kathleen T. Alligood: Chaos an introduction to dynamical systems, Springer – Verlag, New York, 1996.

[2] Hugo L. D. De Souza Cavalcante, Marcos Oria, Didier Sornette, Edward Ott, Daniel J. Gauthier: "Predictability and suppression of extreme events in complex systems", Arxiv 2013.

[3] C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, And Q. Dahe: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Cambridge University Press, 2012.

[4] F. Takens, "Detecting Strange Attractors in Turbulence", Lecture Notes in Math. Vol.898, Springer, New York (1981).

[5] T. Sauer, J. Yorke, and M. Casdagli, Embedology, J. Stat. Phys. 65, 579 (1991).

[6] David Ruelle: "Early chaos theory", Physics Today, May 2013, page 27.

[7] M. Richter and T. Schreiber, Phase space embedding of electrocardiograms, Phys. Rev. E 58, 6392 (1998).

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

[9] Rasband: Chaotic Dynamics of nonlinear systems, Jhon

Wiley & Sons, 1990.

[10] Mandelbrot BB: La Geometría Fractal de la Naturaleza, Tusquets Editores SA. Barcelona, 1997.

[11] J.-P. Eckmann and D. Ruelle, Ergodic theory of chaos and strange attractors, Rev. Mod. Phys. 57, 617 (1985).

[12] H. Takayasu: Fractals in the physical sciences, Manchester University Press, 1.990.

[13] Freedman, David H: "Chaos Theory" Inc; Boston; Oct 20, 1998.

[14] Alligood, K. T.; SAUER, T.; YORKE, J. A: Chaos: An Introduction to Dynamical Systems, Springer-Verlag. New York, 1996.

[15] Palmer, T., And R. Hagedorn: Predictability of Weather and Climate, Cambridge University Press, 2006.

[16] M Pareja. "Radiación solar y su aprovechamiento energético", Marcombo S.A.; Barcelona España, ISBN: 9788426715593, 2010, pag 14-42, 149 – 177.

[17] A. Creus; "Energía termosolar", Cano pina S. L., Cataluña España, 2010, ISBN:978-84-95693-46-4.

[18] A. Castañeda, A. González, R. Guzmán, O. Ibarra; "Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso", Acta Universitaria, Universidad de Guanajuato, Vol. 23, 2012.

[19] LEAL Armando, RAMÍREZ Amado, VÁSQUEZ Lisandro; "Experiencias prácticas en la explotación del secador solar multipropósito", CIES, Editorial Universitaria, Cuba, 2010.

[20] R. Bergues, J. Abdala , P. Griñán; "Concepción y evaluación de un secador solar de gramos con cubierta de polietileno", Universidad de Oriente, Cuba, 2010.

[21] MIRANDA-ZAMORA William, TEIXEIRA Arthur; "Principios matemáticos del proceso térmico de alimento", A. Madrid Vicente Ediciones, Madrid, España, 2012.

[22] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong and A.S. Mujumdar, 2012, "Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations", ISBN: 978-981-07-3336-0

[23] C. Siviapaucar, H. Cuero, E. Huancahuari, V.Llantoy, A. Valderrama, "Calculation and construction of a solar dryer by natural convection for drying of non traditional medicinal plants", Centro de investigaciones en termofluidos CEDIT.

[24] A. Picard, R S Davis, M Gläser and K. Fujii, 2008, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)", Metrología 45, 149-155.

[25] Cárdenas Villenas, Galo Eduardo; Dávila Torres, Jorge Roberto [Director de Tesis], "Optimización del proceso de secado de la manzanilla (matricaria chamomilla) y del toronjil (Melissa officinalis) con la Unión de Comunidades Indígenas y Campesinas de Juan Montalvo (UCICJUM), Mixed materials Publisher: QUITO EPN 2009, FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y AGROINDUSTRIA 2009, EPN.