

STS-50

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN SISTEMA PARA DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA, BASADO EN HUMIDIFICACIÓN-DEHUMIDIFICACIÓN DE AIRE

Jorge A. Escobedo-Bretado, Ignacio R. Martín-Domínguez* y María T. Alarcón-Herrera

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV)
Departamento de Medio Ambiente y Energía
Miguel de Cervantes 120. Complejo Industrial Chihuahua. 31109 Chihuahua, Chih. México.
* (614) 439-1148 ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

Se presentan los resultados de la simulación del comportamiento térmico de un destilador solar de agua, que utiliza:

Un subsistema de captación y almacenamiento de energía solar, basado en colectores planos, termotanque estratificado y aceite térmico.

Un subsistema para el calentamiento de aceite-aire y aceite-agua, dotado de intercambiadores de calor que utilizan el aceite térmico del termo tanque.

Un evaporador por el cual se hace circular, en contacto directo y a contra flujo, aire y agua previamente calentados.

Un condensador aire-aire, en el cual se enfría el aire proveniente del evaporador, rechazando calor hacia la atmosfera, y en el cual se obtiene el agua destilada.

El sistema se modela y simula en TRNSYS (Transient Systems Simulation Program), utilizando las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, Chih. Se simulan periodos de un año de operación, para determinar el rendimiento anual del sistema. Se utilizan como parámetros de análisis el volumen del termotanque, el área de captación solar y el flujo másico de aire que entra al evaporador.

El objetivo del estudio es determinar la sensibilidad de la capacidad del equipo, medida en litros anuales de agua producida, ante los cambios en los parámetros mencionados, como parte del proceso de diseño y optimización del sistema de destilación.

ABSTRACT

This work presents the simulated thermal behavior of a solar water distiller, which uses:

- A solar energy collection and storage subsystem based on flat collectors, stratified thermotank and thermal oil.
- A subsystem for oil-air and oil-water heating, equipped with heat exchangers that use the thermal oil of the thermotank.
- An evaporator through which previously heated water and air flow in direct contact at counter-flow.
- An air-air condenser, where the air from the evaporator cools by rejecting heat to the atmosphere and simultaneously producing distilled water.

The system is modeled and simulated in TRNSYS (Transient Systems Simulation Program) using the climate conditions of the city of Chihuahua, Chih. A year of continuous operation was simulated to determine the annual yield of the system. The analysis parameters include the volume of the thermotank, the solar collection area and the air mass flow that enters the evaporator.

The objective of this study is to determine the sensitivity of the system's capacity, measured in liters produced per year, to the changes in the aforementioned parameters. This is done as part of the design and optimization process of the distillation system.

Palabras clave

Destilación solar de agua, estado transitorio, simulación en TRNSYS, diseño de sistemas térmicos.

NOMENCLATURA

a	Aire
Col	Colectores
h	Entalpía y horas
HX	Intercambiador de calor
i	Entrada
m	Flujo másico
o	Salida
Oil	Aceite
T	Temperatura
TAT	Tanque de almacenamiento térmico
TO	Tiempo de operación
w	Agua

LETRAS GRIEGAS

ω	Humedad específica o absoluta
ϕ	Humedad relativa

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Resulta loable obtener agua potable a partir de agua de mar o salobre a través de energía solar térmica. El acceso a fuentes mejoradas de agua potable es parte de uno de los ocho objetivos de desarrollo del milenio (ODM) creado por la organización de las naciones unidas (ONU) y establecidos para el año 2015 (ONU, 2000). Para obtener agua potable, a partir de agua salobre, se

conocen dos procesos principales. Estos procesos son: los que implican un cambio de fase como destilación súbita por efecto flash, destilación por efecto múltiple, compresión térmica de vapor y evaporación por congelación (MSF, ME, CV, por sus siglas en inglés respectivamente), y los que no, como osmosis inversa (RO), electrodiálisis (ED) e Intercambio Iónico. Sin embargo, estos procesos consumen grandes cantidades de energía, por ejemplo 12 kWh/m^3 en destilación por compresión de vapor (Buros, 2000). Ante la creciente escasez de combustibles fósiles y el incremento en su costo, y sumado a los aspectos económicos los efectos ambientales, se hace cada vez más deseable preferir la utilización de energías renovables como la solar, cuyos beneficios y limitaciones son ampliamente conocidos (Delyannis, 2003), como fuente de energía a utilizarse en la obtención de agua potable para consumo humano.

Una alternativa para llevar a cabo la destilación de agua, es emular el ciclo hidrológico. Actualmente, para realizar dicho proceso, se usa la denominada "caseta de destilación", sin embargo este dispositivo es el menos apropiado para su construcción a gran escala porque, debido a que si bien, para capacidades pequeñas tiene un costo relativo bajo, éste aumenta notablemente cuando se incrementa el tamaño, como se muestra en la figura 1 (Thomas, 1997). Se argumenta que una de las razones de su baja eficiencia es el bajo desempeño de la cubierta transparente de las casetas en su función de condensador (Martín-Domínguez *et al.*, 1998). Para tratar de mejorar la eficiencia en el proceso de destilación solar, Martín-Domínguez *et al.*, (1998), Al-Enezi *et al.*, (2006), Yamali *et al.*, (2007) y Hermosillo *et al.*, (2008), realizaron investigaciones donde se propone un sistema de destilación solar basado en un circuito cerrado de aire, el cual es humidificado y dehumidificado a lo largo del proceso.

En el presente trabajo se busca estudiar el comportamiento de un sistema similar al propuesto por los investigadores antes mencionados, pero mediante un análisis paramétrico realizado mediante simulación numérica. Dicho sistema es simulado con el software TRNSYS con las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua (Martín-Domínguez *et al.*, 2002). La información generada de esta forma ayudara a entender el funcionamiento del sistema propuesto, que debido a la complejidad introducida por la variación continua de las variables ambientales, no ha sido posible entender mediante procedimientos experimentales aislados.

OBJETIVO

Analizar paraméricamente el comportamiento de un nuevo sistema de destilación por evaporación solar de agua, mediante la generación de información de comportamiento a través de simulación numérica, en el paquete TRNSYS. Los parámetros en estudio serán, el número de colectores, el volumen del termotanque y el flujo másico de aire de entrada al evaporador. Se desea ver el comportamiento de la producción estimada anual de agua destilada, y el tiempo de operación diario del subsistema de destilación.

METODOLOGÍA

En la figura 2 se muestra el sistema propuesto, donde se observan los diferentes equipos que lo componen y el arreglo constructivo.

Para su análisis, el sistema es dividido en dos subsistemas como lo muestra la figura 3.

Subsistema de captación y almacenamiento térmico, mediante el uso de un arreglo de colectores solares planos se calienta aceite térmico, y la energía es almacenada en un termotanque estratificado térmicamente.

Subsistema de destilación, éste subsistema utiliza la energía almacenada en el termo-tanque para calentar las corrientes de agua y aire que entran a la torre de evaporación.

Este análisis se realiza en el paquete de simulación de sistemas térmicos TRNSYS 16, donde se desarrolló el modelo del sistema de destilación y cuyos componentes principales son:

- Arreglo de colectores solares planos en paralelo
- Tanque de almacenamiento térmico vertical estratificado (Termotanque)
- Sistema de control para el encendido y apagado de las bombas de recirculación de ambos subsistemas.
- Intercambiadores de calor aceite-agua HXow y aceite-aire HXoa.
- Bombas para la circulación del aceite térmico en los subsistemas de almacenamiento térmico y destilación.
- Ventilador para la circulación del flujo de aire que debe entrar al evaporador.
- Evaporador.
- Condensador.

MODELOS TRNSYS UTILIZADOS

Para la simulación del sistema de destilación solar se seleccionaron modelos matemáticos genéricos, disponibles en la librería de TRNSYS, adecuándolos a las características exactas de los equipos utilizados mediante la asignación de valores a los parámetros de diseño. Los dispositivos simulados fueron:

Condiciones atmosféricas

Generador de clima

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Chihuahua son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS, basándose en datos experimentales promedio de temperatura, irradiación solar, humedad relativa y altitud, y mediante modelos matemáticos. La obtención de la información climática requerida por el modelo de TRNSYS se analiza en otro trabajo (Martín-Domínguez y Hernández-Álvarez, 2002), en el cual se presentan los datos de cuatro ciudades del estado de Chihuahua.

Procesador de radiación

Este modelo toma el dato de radiación total horizontal horaria producido por el Generador de Clima, y lo procesa para suministrarle a los colectores valores de irradiación a cualquier fracción de tiempo, y de acuerdo con la inclinación dada a las superficies de captación de los colectores.

Equipo térmico

Colectores Solares

Se utilizó el modelo para curva de eficiencia térmica lineal. Los colectores solares planos a utilizarse corresponden a un modelo disponible comercialmente en México, dotados de un área de captación de 1.86 m^2 cada uno. La curva de eficiencia térmica provista por el fabricante señala una ordenada al origen de 0.72 y una pendiente de $-6.8 \text{ kJ}/(\text{h m}^2 \text{ K})$. La tasa de flujo de prueba de los colectores fue de $2 \text{ L} / \text{min}$.

Tanque de almacenamiento térmico

El termotanque se simula utilizando el modelo de Tanque Estratificado de TRNSYS. El volumen total del tanque es una de las variables a analizar. Cuenta con dos entradas y dos salidas de

aceite. La entrada del aceite frío, que proviene de los intercambiadores de calor, se encuentra en la parte inferior del tanque. El flujo proveniente de los colectores solares ingresa al termostanque por la parte superior. La salida del aceite caliente hacia los intercambiadores de calor HXow y HXoa ocurre por la parte superior. La salida hacia los colectores solares es por la parte inferior del tanque.

Intercambiadores de calor

Este componente modela un intercambiador de calor a contra flujo. Si se le alimenta de información de temperaturas y flujos de entrada, el equipo es capaz de calcular su efectividad para un cierto coeficiente global de transferencia de calor (UA). Para el caso de interés se tomaron valores de 8,500 y 4,500 kJ/h·K para los intercambiadores de calor HXow y HXoa respectivamente.

Deben especificarse los calores específicos para cada fluido. En el caso del agua y aire se tomó como 4.19 y 1.005 kJ/kg·K respectivamente. En el caso del aceite, se trata de un fluido de transferencia térmica DOWTHERM Q (The Dow Chemical Company, 2009), que cubre el intervalo de temperatura deseado (-15°C a 200°C).

Equipo de circulación de fluidos

Bombas de Agua y Aceite

La bomba que hace circular aceite por el subsistema de almacenamiento térmico, arranca cuando incide, en los colectores, una radiación solar igual o mayor a 100 W/m². Cuando la radiación solar no alcanza dicho valor, la bomba permanece apagada.

Las bombas que hacen circular aceite a través de ambos intercambiadores de calor son accionados a través de una señal generada por un controlador. Dicho controlador produce la señal en base a una diferencia de temperaturas (20°C) entre las partes superior e inferior del termostanque. Cuando la diferencia de temperaturas es menor a la antes mencionada, las bombas permanecen apagadas.

Ventilador

El ventilador produce el flujo de aire que entra al evaporador pasándolo previamente por el HXoa, el cual aumenta su temperatura disminuyendo su humedad relativa.

MODELOS PROPUESTOS

Evaporador

Usando la figura 4 y aplicando las ecuaciones de balance de materia y energía (1 y 2 respectivamente), se obtiene el modelado del evaporador.

Balance de materia

$$m_{wi} + m_a \cdot \omega_i = m_{wo} + m_a \cdot \omega_o \quad (1)$$

Balance de energía

$$m_{wi} \cdot h_{wi} + m_a \cdot h_{ai} = m_{wo} \cdot h_{wo} + m_a \cdot h_{ao} \quad (2)$$

Condensador

El condensador modelado, es forzado para que el aire que proviene del evaporador, y después de pasar por el condensador, salga con una humedad relativa de 100 % y una temperatura superior, en un ΔT especificado, a la temperatura ambiente, ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$ en este caso).

La cantidad de agua destilada obtenida en el condensador se obtiene de la diferencia entre las humedades absolutas de entrada y salida del condensador, multiplicada por el flujo másico.

$$W_{Destilada} = m_a \cdot (\omega_i - \omega_o) \quad (3)$$

En la figura 5 se muestran los parámetros que obligan este comportamiento.

El proceso deseado de humidificación y dehumidificación se muestra en la figura 6. En este proceso se observa, que al aumentar la temperatura del aire, su humedad relativa disminuye. La línea vertical indica el proceso de evaporación. Desde el momento que el aire entra al condensador, sigue una línea de humedad relativa constante (100 %) hasta su salida, donde su temperatura esta 5°C por arriba de la ambiente.

SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Se simuló la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada 15 minutos (paso de tiempo). Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad de Chihuahua, Chih.

Los resultados generados por TRNSYS se muestran gráficamente en pantalla con resolución de 15 minutos.

El número de corridas efectuadas se obtuvo de la combinación de las variables que se muestran a continuación:

Número de Colectores: 2, 4, 6, 8, 10 y 12

Volumen del termostanque (m³): 1, 3, 6, 9 y 12

Flujo másico de aire (kg/h): 8, 10, 12, 14 y 16

El número total de corridas es de 150.

RESULTADOS

Los datos anualizados obtenidos son el resultado de la integración diaria de las funciones de respuesta.

Caso particular

Variación del número de colectores y flujo másico de aire para un TAT de 3 m³.

Producción de agua destilada

En los resultados presentados en la figura 7, se observa la producción anual de agua destilada como función del número de colectores utilizados, para diferentes flujos másicos de aire, y un termostanque de 3 m³.

Se observa que la mayor productividad anual de agua destilada, por m², se presenta cuando se tiene el mayor número de colectores (12), y el menor flujo másico de aire (8 kg/h).

Tiempo de Operación

En la figura 8, se presenta las mismas condiciones que en la figura 7, sin embargo, la función de respuesta es el tiempo de operación del subsistema de destilación, para un termo-tanque de 3 m³. Con esto se pretende ver si el almacenamiento térmico suministrado es suficiente para mantener la operación continua del subsistema durante los periodos sin insolación. En esto debe tomarse en cuenta que el tiempo anual máximo de operación es de 8,760 horas. De los resultados mostrados, se observa que el menor tiempo de operación (6,250 h) se obtiene con 2 colectores y un flujo másico de aire de 16 kg/h, que corresponde a un sistema que solo funciona durante los periodos con insolación. La condición de operación deseable corresponde a un sistema que almacena suficiente energía como para poder operar continuamente durante día y noche, todo el año, y se obtiene con 8 colectores y un flujo de 8 kg/h de aire.

Se muestra una tendencia asintótica con respecto a la línea del tiempo máximo de operación.

Si bien la velocidad de cambio en el comportamiento de horas de operación es apreciable cuando los colectores aumentan de 2 a 4, esta velocidad de cambio va reduciéndose conforme aumenta el número de colectores.

Efecto del número de colectores instalados

Las figuras 9-13, muestran la producción anual de agua destilada, por m² de colector, y el tiempo anual de operación alcanzado, para diferentes flujos de aire, y todo como función del número de colectores utilizado. Cada gráfica corresponde a un diferente tamaño de termo-tanque.

Es posible apreciar el efecto que tiene el número de colectores utilizados sobre la producción anual de agua destilada, cuando se varía el volumen de almacenamiento térmico, que puede resumirse como:

- Con bajo volumen de almacenamiento térmico, al aumentar el número de colectores se alcanzan altas temperaturas de operación en el aceite térmico, y la producción de destilado es muy alto. Puede inferirse que se estarían alcanzando temperaturas casi de ebullición en el calentamiento del agua que va a la torre. Sin embargo, debido al poco volumen de almacenamiento el sistema opera primordialmente durante las horas con insolación. Esto se observa en la figura 9, para un termotanque de 1 m³, y el comportamiento extraño de las curvas de producción de destilado, que se cruzan entre ellas, puede explicarse en base a la posible presencia de altas temperaturas y su efecto en el cálculo de las propiedades termodinámicas y termofísicas del agua y aire.
- Con un volumen medio de almacenamiento térmico, figura 11, para 6 m³. Se observa que la producción de destilado es mucho menor al caso de bajo volumen de almacenamiento, para igual número de colectores utilizados. Simultáneamente se observa que el número de horas de operación aumenta considerablemente, pues se tiene más energía almacenada disponible durante las horas sin insolación. En este caso el comportamiento de las curvas de producción de destilado es ya coherente.
- Con el volumen máximo analizado, 12 m³ en la figura 13, se observa que la producción anual de destilado es la menor observada de todos los casos anteriores, para igual número de colectores utilizados. Se observa también que el sistema opera el mayor número de horas anuales, al disponer de más energía almacenada.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos mediante simulación se puede concluir que la variable más importante resulta ser la temperatura de operación del sistema. Si se tiene un sistema con poco volumen de almacenamiento térmico, al aumentar el número de colectores solares que le suministran energía, la temperatura que se alcanza en el aceite térmico resulta más elevada, y permite calentar las corrientes de aire y agua a mayor temperatura. Dado que la temperatura de condensación está determinada por las condiciones ambientales, se concluye que, en forma análoga a los ciclos de potencia de las máquinas térmicas, la eficiencia del sistema para destilar agua depende de la diferencia de temperaturas entre las que opera, y no tanto del sistema mismo.

Se observa que al aumentar el volumen de aceite térmico, se logra almacenar más energía para operar de noche, pero se

almacena a menor temperatura. El efecto es una menor producción de destilado anual.

Como conclusión final se tiene entonces que la variable que determina la eficiencia, no la cantidad de destilado, es la temperatura de calentamiento de las corrientes de agua y aire. Esto se observa fácilmente del diagrama de proceso mostrado en la figura 6, pues lleva al proceso de evaporación a mayores temperaturas y consecuentemente a mayor cantidad de agua evaporada por kg de aire que circula por la torre.

REFERENCIAS

- Al-Enezi, Ghazi, Ettouney, Hisham, Fawzy, Nagla. (2006). Low temperature humidification dehumidification desalination process. *Energy Conversion & Management*. V47 pp.470-484.
- Delyannis, E. (2003). Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*. V75 pp.357-366.
- Hermosillo Villalobos J. J. y Estrada Gasca C. A. (2008). Modelo matemático y prototipo experimental de un sistema desalinizador mediante humidificación de aire. *Memorias de la XXXII Semana Nacional de Energía Solar*. ANES. Oct. 20-24, 2008. Mérida, Yucatán. México.
- Martín-Domínguez I. R, Pérez Galindo, J. A., Martín-Domínguez A., Hensen-Rodríguez M. P. (1998). *Solar Destillator using Humid-Air And Heat Pipes For Rural Areas in México*, The international Solar Energy Conference, Albuquerque, New Mexico edited by Jeffrey M. M., University of South Carolina.
- Martín-Domínguez, I.R. y Hernández-Álvarez, R. (2002). Datos climáticos de cuatro ciudades del estado de Chihuahua, para la simulación de uso de energía en edificaciones utilizando el paquete TRNSYS. *Memorias de la XXVI Semana Nacional de Energía Solar*. ANES. ERE 01-49 pp.181-185. Nov. 11-15, 2002. Chetumal, Quintana Roo. México.
- Thomas, K. E. (1997). *Overview of Village Scale, Renewable Energy Powered Desalination*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. USA.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2009).
- Yamali, Cemil. Solmus, Ismail. (2007). Theoretical investigation of a humidification-dehumidification desalination system configured by a double-pass flat plate solar air heater. *Desalination*. V205 pp.163-177.
- World health Organization (WHO). (2009). *World health statistics 2009*.

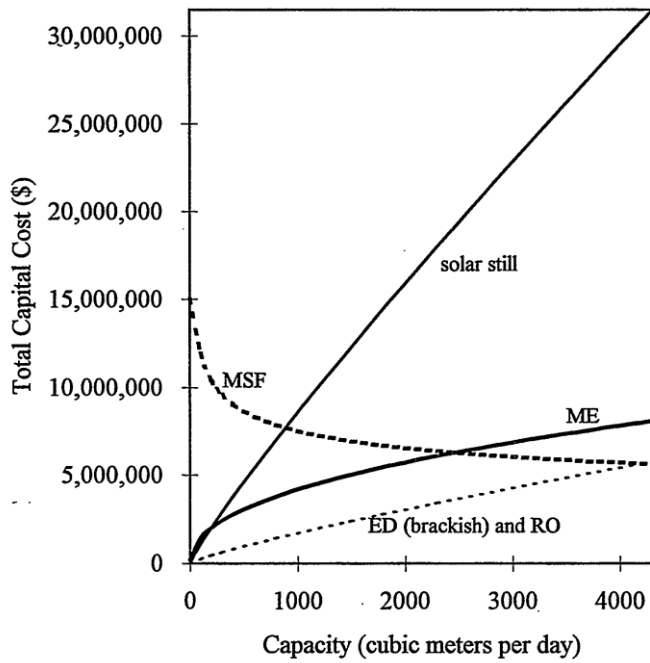


Figura 1. Escala económica relativa para diferentes tecnologías de desalación (Thomas, K. E., 1997).

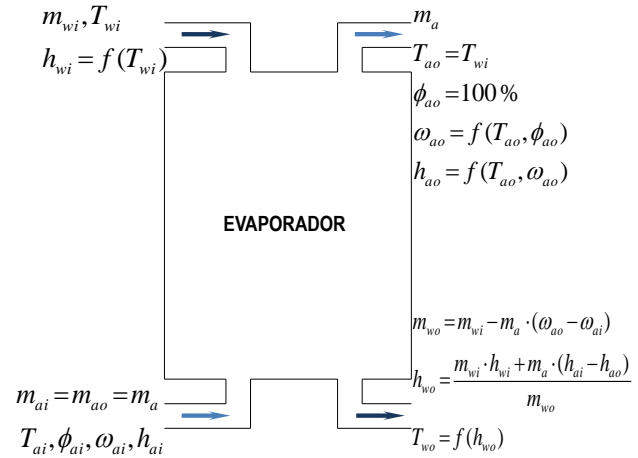


Figura 4. Balance de materia y energía en el evaporador.

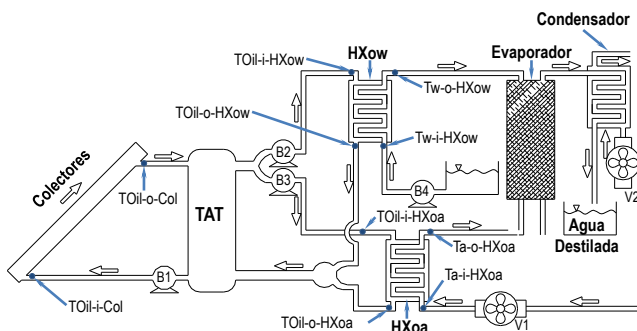


Figura 2. Esquema del sistema para destilación de agua.

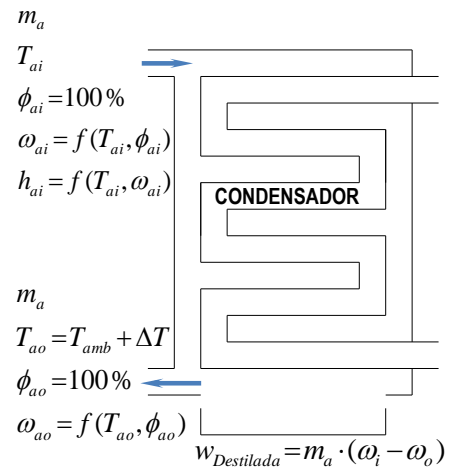


Figura 5. Balance de materia y energía en el condensador.

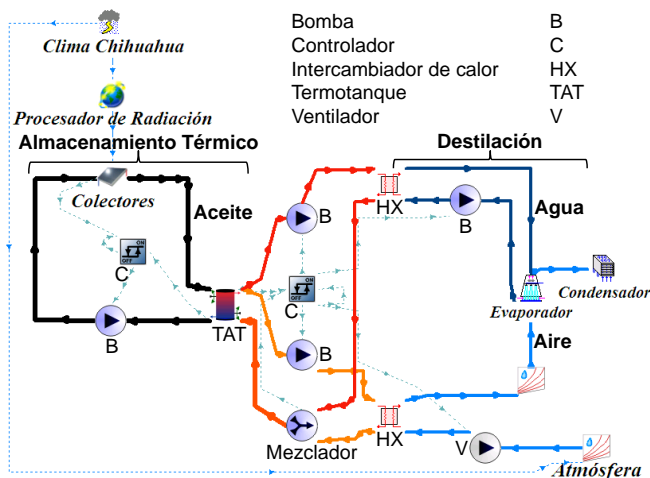


Figura 3. Simulación en TRNSYS.

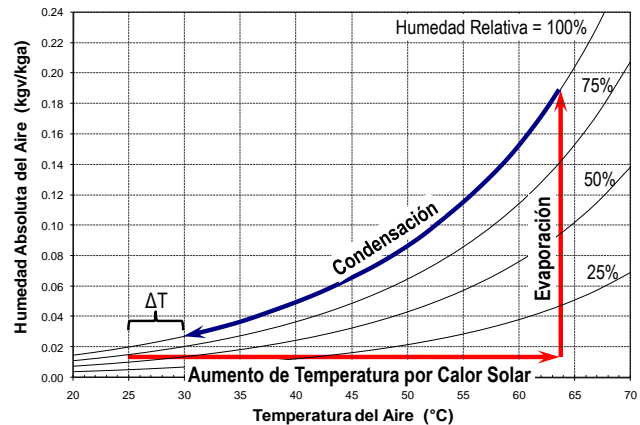


Figura 6. Proceso Psicrométrico del aire.

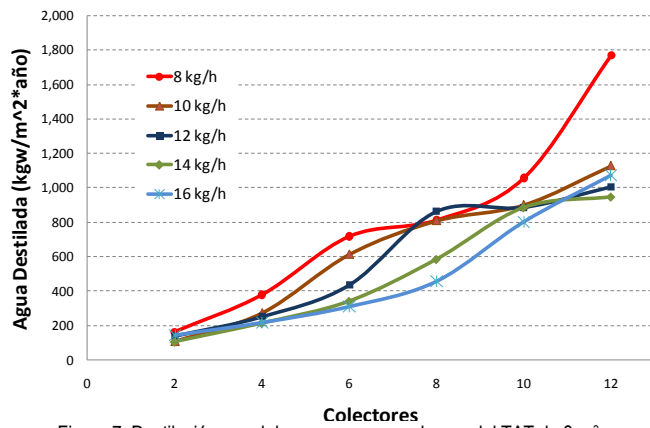


Figura 7. Destilación anual de agua para un volumen del TAT de 3 m³.

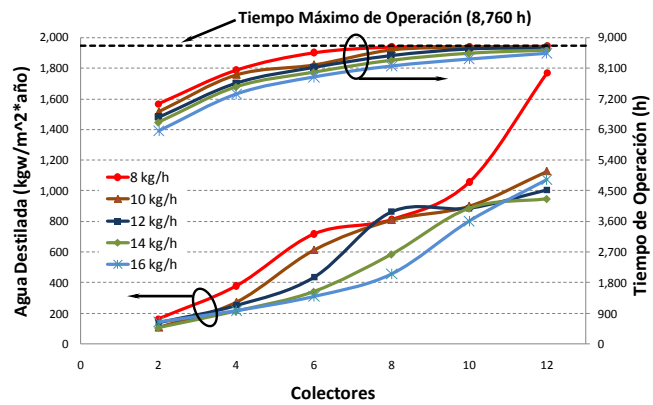


Figura 10. Destilación anual de agua y tiempo de operación para un volumen del TAT de 3 m³ y flujos másicos constantes de aire.

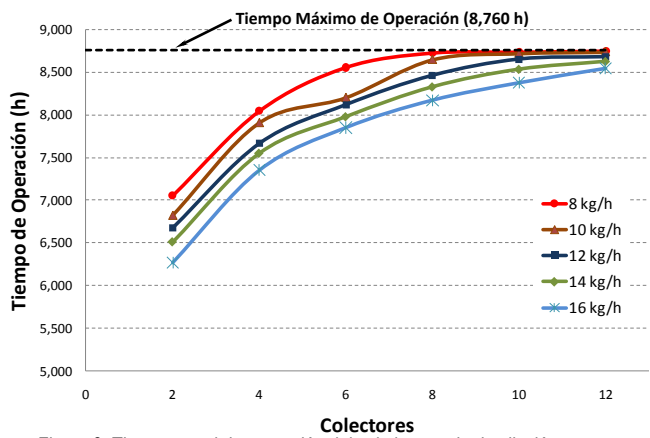


Figura 8. Tiempo anual de operación del subsistema de destilación para un volumen del TAT de 3 m³.

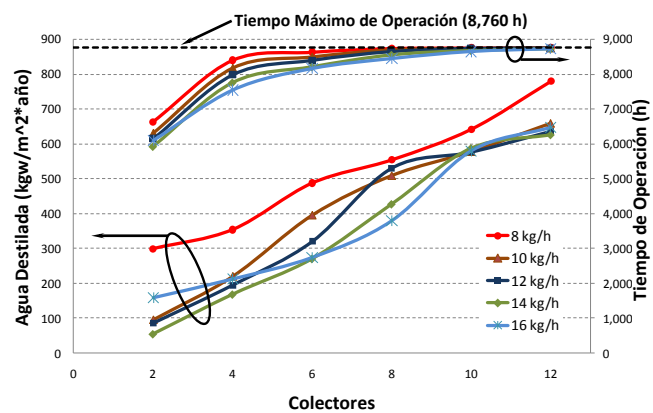


Figura 11. Destilación anual de agua y tiempo de operación para un volumen del TAT de 6 m³ y flujos másicos constantes de aire.

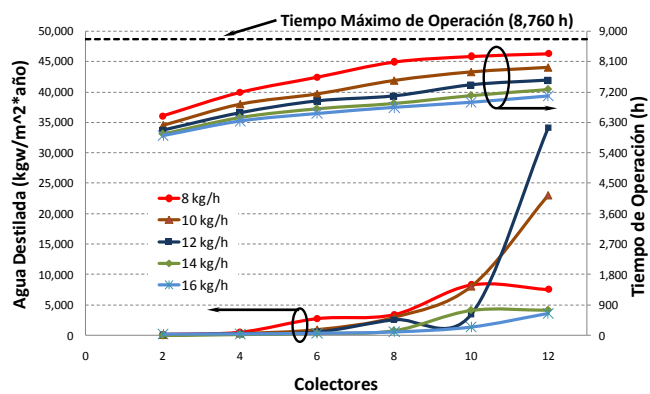


Figura 9. Destilación anual de agua y tiempo de operación para un volumen del TAT de 1 m³ y flujos másicos constantes de aire.

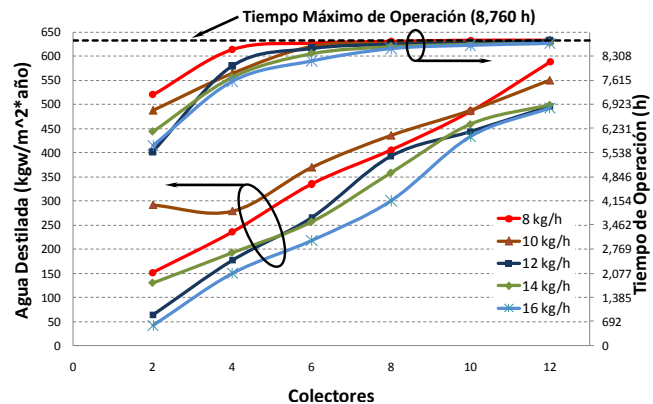


Figura 12. Destilación anual de agua y tiempo de operación para un volumen del TAT de 9 m³ y flujos másicos constantes de aire.

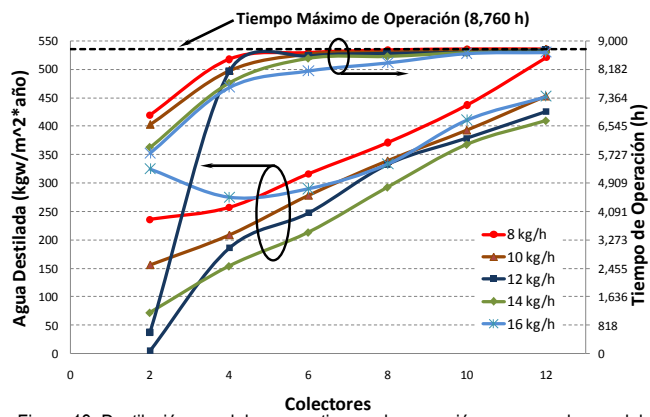


Figura 13. Destilación anual de agua y tiempo de operación para un volumen del TAT de 12 m³ y flujos máxicos constantes de aire.