

Identificación de variables que impactan en la Eficiencia Energética de Secadoras de ropa.

Luis Manuel Rojas Torres

Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya
Grupo de Física Aplicada de Mabe Tecnología y Proyectos
luis.manuel.rojas@mabe.com.mx

Luis Alberto Ruiz López

Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya
Grupo de Física Aplicada de Mabe Tecnología y Proyectos
luis.alberto.ruiz@mabe.com.mx

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Departamento de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Fernando Sosa Montemayor

Grupo de Física Aplicada de Mabe Tecnología y Proyectos
fernando.sosa.montemayor@mabe.com.mx

Luis Ballesteros Martínez

Grupo de Física Aplicada de Mabe Tecnología y Proyectos
luis.ballesteros@mabe.com.mx

RESUMEN

Este artículo presenta el estudio de identificación de variables que mayor impacto tienen en la eficiencia energética de una secadora de ropa de tipo doméstico. También se presenta un análisis funcional donde se describen los procesos físicos que se llevan a cabo durante un ciclo de secado, desde la generación de calor a través de un calentador eléctrico, hasta la extracción de la humedad de ropa a través de tubos de escape. Posteriormente, se delimita el “Proceso de Secado” dentro del tambor de la secadora, como el fenómeno a entender, explicar y modelar para mejorar su eficiencia. Por medio de un diagrama de parámetro (Diagrama P) y un panel de expertos es que se entiende el proceso de secado de ropa, y son determinadas las variables de entrada

que el sistema necesita; así como las de salida que el sistema entrega. A través de estudios teóricos previos es como se explica que variables físicas deberán controlarse para obtener una mejor eficiencia energética. Para validar dichos estudios teóricos previos, se plantea modelar experimentalmente el fenómeno de secado, a través de la construcción de un prototipo funcional y un diseño de experimentos (DOE). Con estas actividades se logra determinar que variables tienen el mayor impacto sobre la eficiencia energética en el proceso de secado; logrando identificar que una disminución en 15% de la humedad relativa del aire que entra a la secadora, podría ayudar a disminuir hasta en un 17% el consumo energético. También el estudio reveló las variables físicas que podrían hacer un ciclo de secado de ropa más rápido.

Palabras clave: Secado textil, Diseño de experimentos, Consumo de energía, Humedad relativa, Flujo de aire, Temperatura de aire, Tiempo de secado.

1. INTRODUCCIÓN

La conciencia global en el ámbito de la sostenibilidad y la conservación de la energía se ha convertido en vital para los fabricantes de electrodomésticos y la preocupación por fabricar unidades más eficientes se vuelve cada vez mayor. Con avances logrados en eficiencia energética sobre muchos otros electrodomésticos, se ha vuelto más importante reducir el consumo de energía de las secadoras de ropa, que representan el 6% del consumo mundial de energía [1].

Diversos estudios [2-7] sobre el proceso de secado de ropa se han llevado a cabo, en los cuales se buscan principalmente tres cosas: *eficientar el proceso de secado*,

disminuir el tiempo de secado y disminuir el consumo energético. J. Deans [2] realizó un modelo de computadora para simular el proceso de secado, encontró que el consumo de energía es principalmente influenciado por la temperatura ambiente del aire y su humedad relativa a la entrada y que aproximadamente el 16% de la energía de entrada se pierde. Lena Stawreberg [3] a través de balances de masa y energía mostró que la principal pérdida de energía se encuentra entre el calentador y el tambor. J. E. Braun et. al. [4] estudiaron un ciclo con bomba de calor en las secadoras de ropa, se concluye que su modelo ofrecía arriba de 40% de mejora en eficiencia de energía mientras que Bansal et. al. [5] calculó un 14% usando modelos de secadoras de ciclo abierto y ciclo cerrado con intercambiadores de calor. La desventaja de secadoras con bomba e intercambiador de calor, es que los componentes necesarios para implementar este sistema, pueden hacerlo no tan factible. Bansal et. al. [6] estudiaron el modelo e implementación de un diseño de secadora utilizando un intercambiador de calor de agua que calentaba el aire en lugar del calentador convencional, se encontró una mejora del 7-10% en eficiencia y un ciclo de secado entre 5 y 10% más rápido, sin embargo no se habla del consumo de energía de la bomba de agua ni del uso posterior de la misma. Kamal Rezk y Jan Forsberg [7] realizaron una simulación en CFD (computer fluid dynamic), en donde estudiaron dos modificaciones en la geometría del ducto y obtuvieron una reducción de la caída de calor de aproximadamente 23%, el modelo arrojó buenos resultados, sin embargo, faltó su validación experimental.

El proceso de secado consta de dos efectos principales “Calor” y “Aire”. Una secadora aplica la mezcla de estos dos fenómenos, en la figura 1 se muestra un modelo de deshidratación de agua sobre prendas en un cierto periodo de tiempo [2], presenta la

curva de calentamiento del aire a la salida del proceso, además de la temperatura de las prendas. Este proceso se muestra en las siguientes etapas: (a-b) zona de calentamiento de las prendas y el cuerpo de la secadora, (b-c) en esta etapa el agua se satura para dar paso a la evaporación y (c-d) aumento de temperatura del tambor y de la ropa acompañado de la disminución de contenido de humedad en la ropa y humedad relativa del aire de salida.

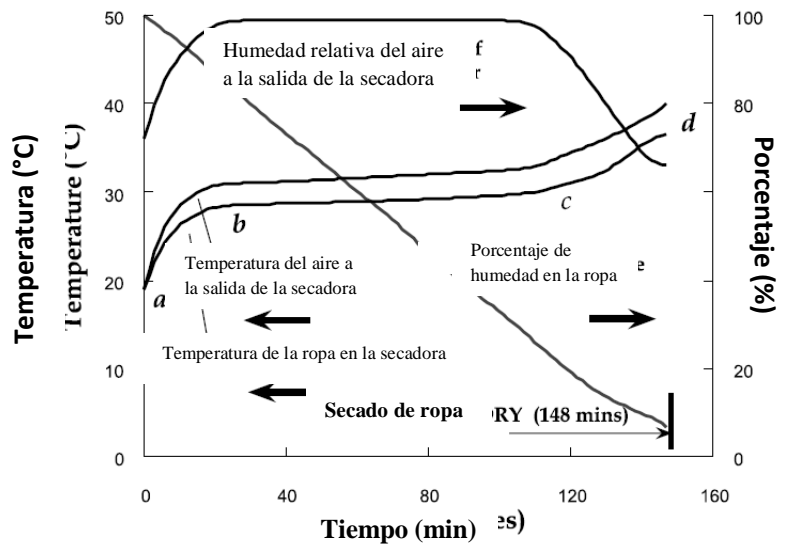


Figura 1. Proceso del ciclo de secado.

Tomando en cuenta que el estudio de Deans y otros autores como Karnal Resk tuvieron un alcance teórico, es que se hace necesario un entendimiento y validez experimental, de sus postulados, hipótesis y/o conclusiones. Asimismo, es importante verificar que tan válidas son en los productos actuales que son diseñados en la empresa en donde se desarrolla esta investigación.

2. METODOLOGÍA

La figura 2 muestra la metodología llevada a cabo en esta investigación, que inicia con el entendimiento de los fenómenos y variables involucradas en el proceso de secado,

seguido de una hipótesis que plantea eficientar dicho proceso, para finalmente ser validada mediante un modelo experimental.

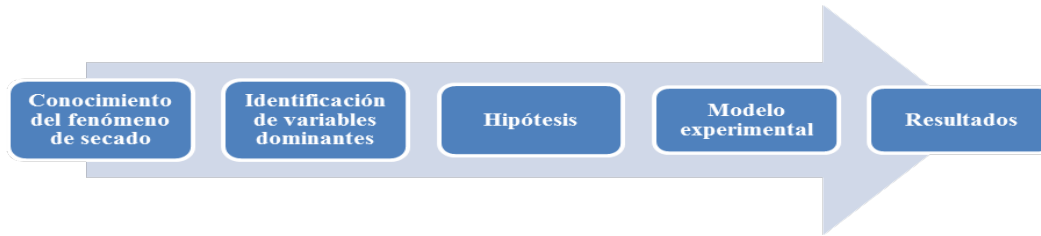


Figura 2. Metodología.

2.1 Análisis Funcional de Procesos Físicos

La estructura de la secadora doméstica estudiada en esta investigación se muestra en la figura 3. El proceso de secado que lleva a cabo se da a través de diferentes procesos, estos procesos se describen en el análisis funcional que se muestra en la figura 4.

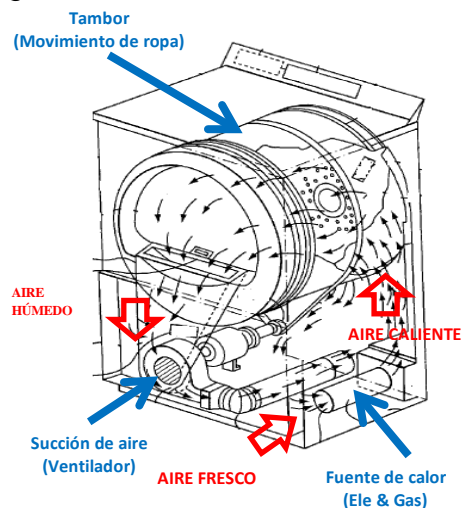


Figura 3. Estructura de una secadora remota.

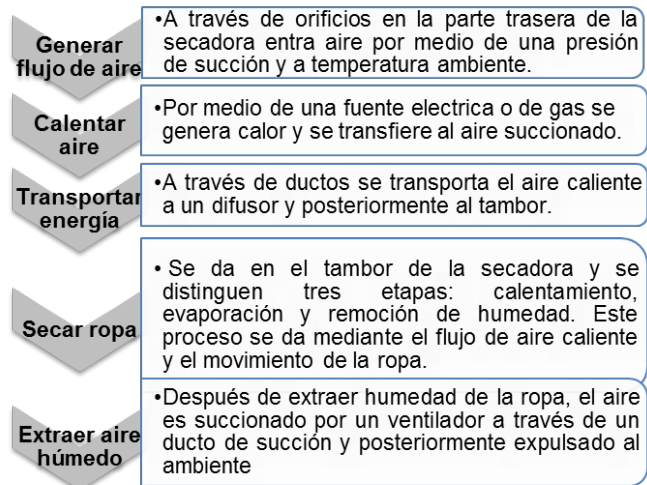


Figura 4. Análisis Funcional de procesos físicos de calentador que ocurren durante un ciclo de secado de ropa.

2.1.1 Generación de calor

Para este caso de estudio se utilizó una fuente de calor eléctrica, la cual funciona a través de una resistencia eléctrica.

Cuando existe una corriente eléctrica en un conductor, la energía eléctrica se convierte continuamente en energía térmica del mismo. El campo eléctrico en el conductor acelera los electrones libres durante un intervalo corto de tiempo, con lo que adquieren un incremento de energía cinética que rápidamente se convierte en energía térmica del conductor por los choques entre los electrones de la red de iones del conductor [8]. La energía perdida por unidad de tiempo es la potencia P disipada en el conductor.

$$P = IV \quad (1)$$

La caída de potencial es la disminución de energía potencial por unidad de carga y la corriente es la carga que fluye por unidad de tiempo. La energía cedida al conductor al paso de la corriente recibe el nombre de calor por efecto Joule, o simplemente calor de Joule [8].

2.1.2 Mecanismos de secado

En general es necesario que estén involucrados dos fenómenos en la operación de secado [9]:

Evaporación de la humedad de la superficie.

La evaporación de humedad de una superficie mojada se da de la misma manera en que se evapora en una superficie de agua libre. La velocidad de evaporación es constante mientras la superficie está completamente mojada y los factores que afectan la velocidad de secado son su temperatura y su humedad.

La evaporación ocurre debido a la diferencia entre la presión de vapor saturado de agua a la temperatura de la superficie, P_s , y la presión de vapor parcial del agua en el aire

adyacente, P_a , y la velocidad de evaporación es proporcional a esta diferencia de presiones. Mientras más caliente el aire mayor es la diferencia $P_s - P_a$ y en consecuencia mayor la velocidad de evaporación; mientras más húmedo el aire más pequeña es la diferencia $P_s - P_a$ y más baja la velocidad de evaporación. La humedad deja la superficie y pasa al aire inmediato adyacente que está en constante movimiento.

Migración de humedad interna

Existen dos mecanismos principales de migración de humedad interna, difusión y flujo capilar.

De física básica puede tenerse en cuenta que la temperatura de la partícula, su contenido de humedad y sus dimensiones físicas son los factores mas importantes que afectan la velocidad de migración, pero la estructura interna y composición del material son también de importancia.

La ecuación general para la difusión del líquido a través de un sólido poroso es:

$$\frac{\partial M_c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M_c}{\partial x^2} \quad (2)$$

Donde

M_c = contenido de humedad, base seca

t = tiempo

D = coeficiente de difusión

x = distancia de la superficie de partícula

Esta ecuación muestra que el cambio de contenido de humedad con el tiempo es proporcional al cambio de gradiente de humedad a través la partícula del interior a la superficie. En términos prácticos se puede apreciar que la velocidad de secado decrece con el tamaño de partícula.

2.1.3 Mezcla aire-vapor de agua

La psicrometría estudia las propiedades termodinámicas de la mezcla aire-vapor de agua, y una carta psicrométrica (figura 5) describe la relación entre las siguientes variables importantes en el estudio del aire húmedo [10]:

- Temperatura de bulbo seco
- Humedad absoluta
- Temperatura de bulbo húmedo
- Entalpía de saturación
- Humedad relativa.
- Volumen específico.

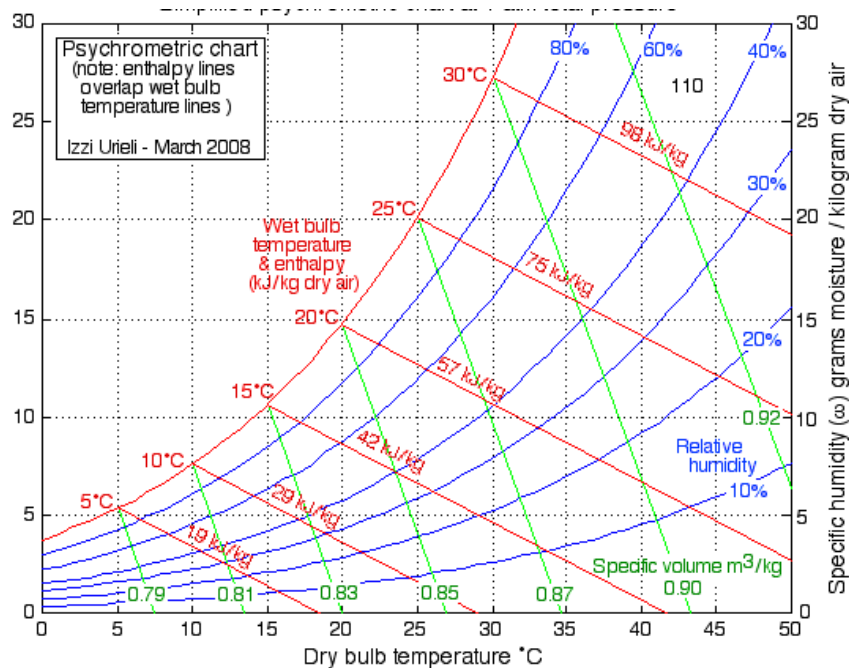


Figura 5. Carta psicrométrica simplificada a 1 atm de presión.

Del diagrama anterior se puede hacer el siguiente análisis: Si por ejemplo se ubica el punto donde se cruza la línea de 60% de Hr con la línea de 25 °C en temperatura de bulbo seco, y entonces se recorre sobre la línea isentálpica hasta el 40% de Hr, se obtiene un aumento de temperatura de ~5 °C y una disminución de humedad específica. En otras palabras, el hecho de solo bajar la humedad relativa del aire sin agregarle energía se ve redituado en un aumento de temperatura y una disminución de su humedad específica, lo que podría mejorar el proceso de secado.

2.2 Diagrama de parámetros

Para entender el fenómeno de secado que ocurre dentro del tambor se planteó el diagrama de parámetros mostrado en la figura 6. La intención fue estudiar este sistema de la manera más aislada posible para entender el fenómeno, y además, identificar que variables son predominantes en el secado de la ropa.

El diagrama P define las variables de entrada y respuesta, así como las variables de ruido que afectan al sistema y las variables de control para el estudio.

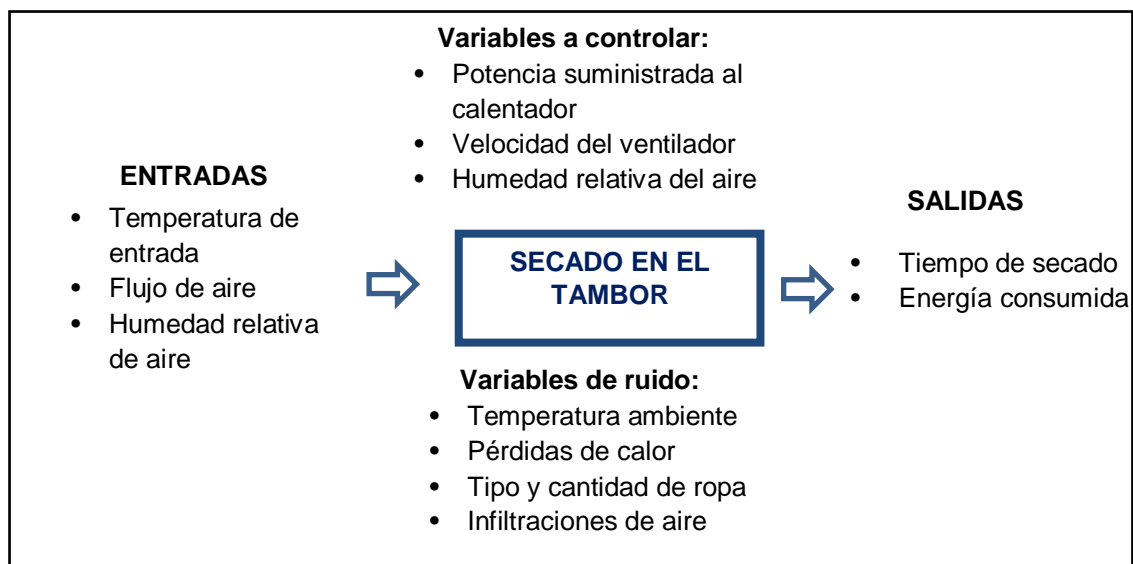


Figura 6. Diagrama de parámetros de secado.

2.3 Modelo Experimental. Construcción del prototipo.

Basado en el diagrama de parámetros se esquematizaron (figura 7a) las partes importantes para la fabricación de una secadora prototipo (figura 7b).

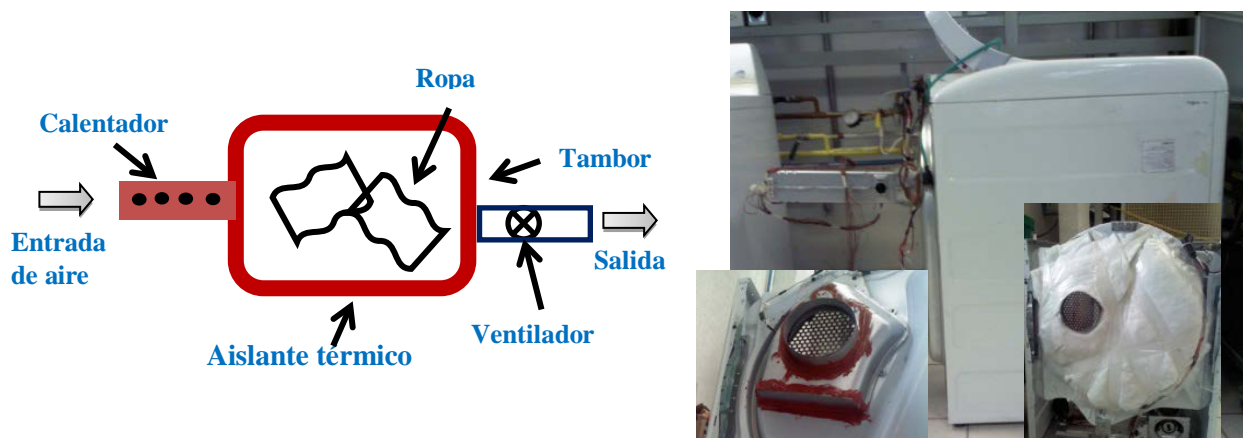


Figura 7. (a) Esquema de sistema unidimensional. (b) Prototipo desarrollado.

Se modificó una secadora, adaptando un calentador eléctrico justo en la entrada de aire al tambor tal como lo indica el esquema, colocando aislante de fibra de vidrio y sellando lo más posible el tambor para reducir las pérdidas de calor (la figura 6b muestra algunos de estos detalles), se colocó además un motor de velocidad variable para el control del ventilador.

Para cada variable de entrada se definieron dos niveles con la intención de llevar a cabo un diseño de experimentos (DOE, Design of experiments). La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable

respuesta; el uso del Diseño de Experimentos aporta esa información y por ello es utilizado en esta investigación. En la tabla 1 se presenta el DOE, arrojando 8 diferentes condiciones. Los valores planteados en la tabla 1 se seleccionaron de acuerdo a los estándares y experiencia de la empresa.

Tabla 1. Diseño de experimentos para estudio de secado en el tambor.

Prueba	Flujo (pies³/min o CFM)	Temperatura de entrada (°F)	Humedad (%)
1	80	350	50
2	80	500	50
3	150	350	50
4	150	500	50
5	80	350	35
6	80	500	35
7	150	350	35
8	150	500	35

2.4 Configuración Experimental.

Construido el prototipo se procedió con el control de las variables de entrada, de tal manera que se obtuvieran los valores definidos en el diseño de experimentos.

2.4.1 Flujo de aire

El flujo de aire de 80 y 150 CFM se obtuvo a través de un motor de velocidad variable conectado a un variador de frecuencia, y con ayuda de una máquina de flujo (que funciona por Anemometría de Hilo Caliente) [11], se determinó a que velocidad del ventilador se obtenían los flujos deseados. Como se observa en la figura 8.

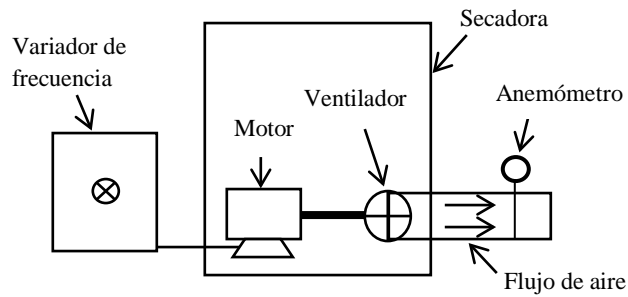


Figura 8. Control de flujo de aire.

2.4.2 Temperatura de entrada

Esto se llevó a cabo en una cámara controlada, (controla la temperatura ambiente y mantiene la humedad relativa del aire al 50%). La cámara tiene la capacidad de controlar el voltaje de salida a las estaciones de prueba, es decir, puede controlar la potencia suministrada al calentador eléctrico de la secadora (figura 9). De esta manera se determinó el voltaje necesario para obtener las temperaturas de 350 y 500 °F a la entrada del tambor (medición que se realizó a través de termopares).

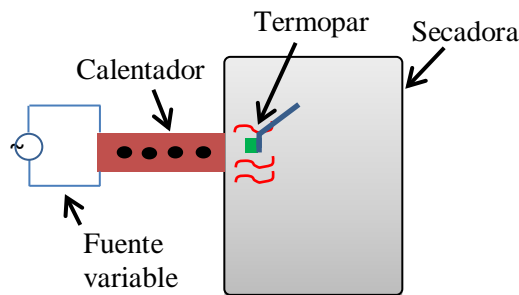


Figura 9. Control de temperatura de entrada al tambor.

2.4.3 Humedad relativa del aire

La cámara de prueba mantiene la humedad relativa al 50% humidificando el cuarto, pero no tiene la capacidad de deshumidificar, de tal manera que la disminución de

humedad al 35% se realizó con un par de deshumidificadores portátiles, manteniendo el valor casi constante al apagarlos y encenderlos tomando mediciones con un psicrómetro, como lo muestra la figura 10.

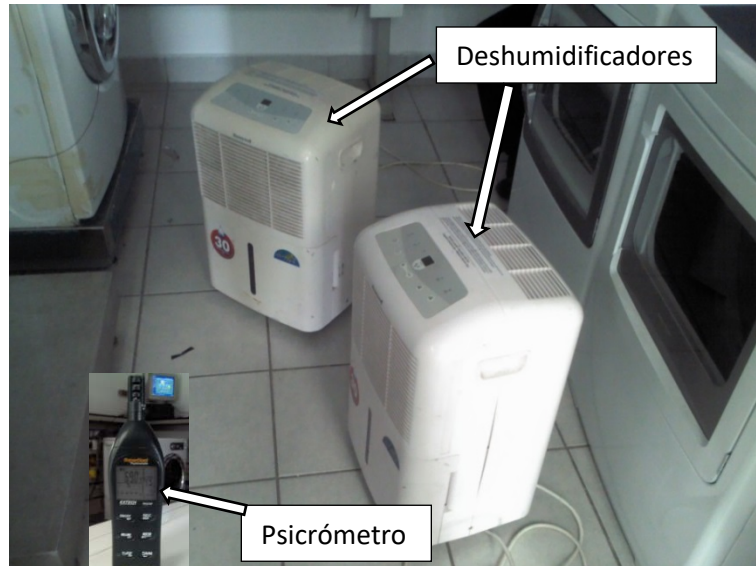


Figura 10. Control de humedad relativa del aire ambiente.

3. Resultados y discusión

Una vez controladas las variables de entrada se corrieron las pruebas marcadas en el DOE, bajo la prueba estándar de energía DOE 2015 [12], de las cual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2, dando como mejor condición en consumo de energía a la prueba 5 pero como mejor condición en tiempo de secado a la número 4, estos resultados serán discutidos más adelante:

Tabla 2. Resultados en consumo de energía y tiempo de secado de las pruebas del DOE.

Prueba	Flujo (pies ³ /min o CFM)	Temperatura de entrada (°F)	Humedad (%)	Consumo de Energía (W-hr)	Tiempo (min)
1	80	350	50	1746	46.4
2	80	500	50	1887	34.9
3	150	350	50	1806	30.6
4	150	500	50	1838	22.4
5	80	350	35	1566	45.5
6	80	500	35	1678	33.4
7	150	350	35	1612	29.1
8	150	500	35	1731	22.5

3.1 Influencia de variables de entrada sobre variables de salida

Según resultados del DOE, con respecto al consumo de energía la variable que presentó mayor influencia fue la humedad relativa del ambiente, en segundo lugar la temperatura de entrada al tambor y en lo que respecta al flujo de aire no tiene mucho peso sobre el consumo de energía, esto se puede observar en la figura 11, donde, la curva con mayor pendiente es la que tiene mayor influencia.

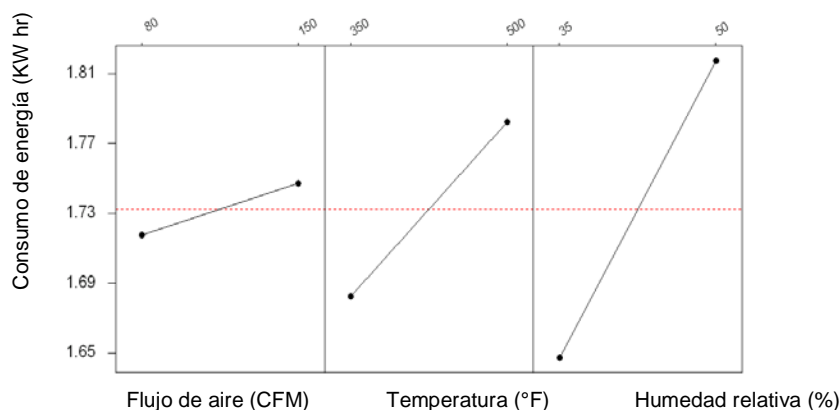


Figura 11. Influencia de variables de entrada sobre el consumo de energía.

En la parte del tiempo de secado, las variables de entrada tuvieron un efecto contrario, es decir, el flujo de aire fue el de mayor importancia, en segundo lugar la temperatura y respecto a la humedad relativa prácticamente no ayuda sobre la disminución de tiempo de secado. Esto se puede observar en la figura 12.

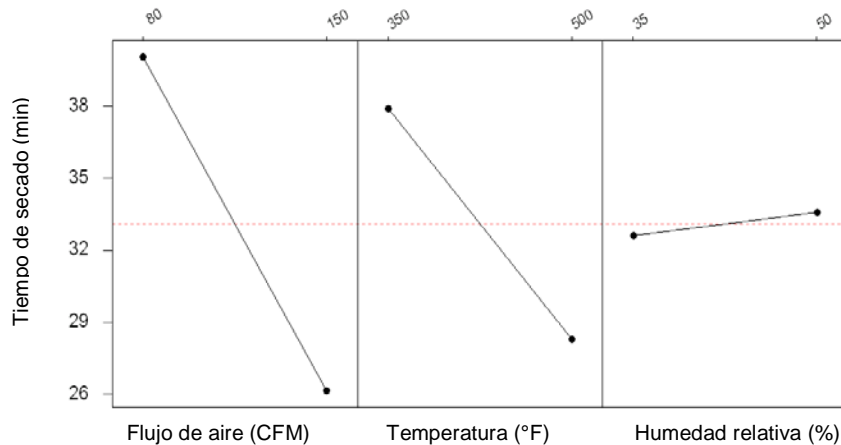


Figura 12. Influencia de variables de entrada sobre el tiempo de secado.

Los resultados muestran la importancia de estas tres variables en el proceso de secado, pero además resaltan a la humedad relativa como la variable más importante en el consumo de energía, es por ello que se puso especial atención a esta variable, pues el objetivo de este estudio es disminuir el consumo de energía.

De la gráfica de la figura 13, se determina que la condición con mejores resultados es la número 7 (150 CFM en flujo de aire, 350 °F en temperatura de entrada y 35% de Hr), ya que presenta un equilibrio entre consumo de energía con 1612 W·hr y tiempo de secado de 29.1 min (dando prioridad al consumo de energía).

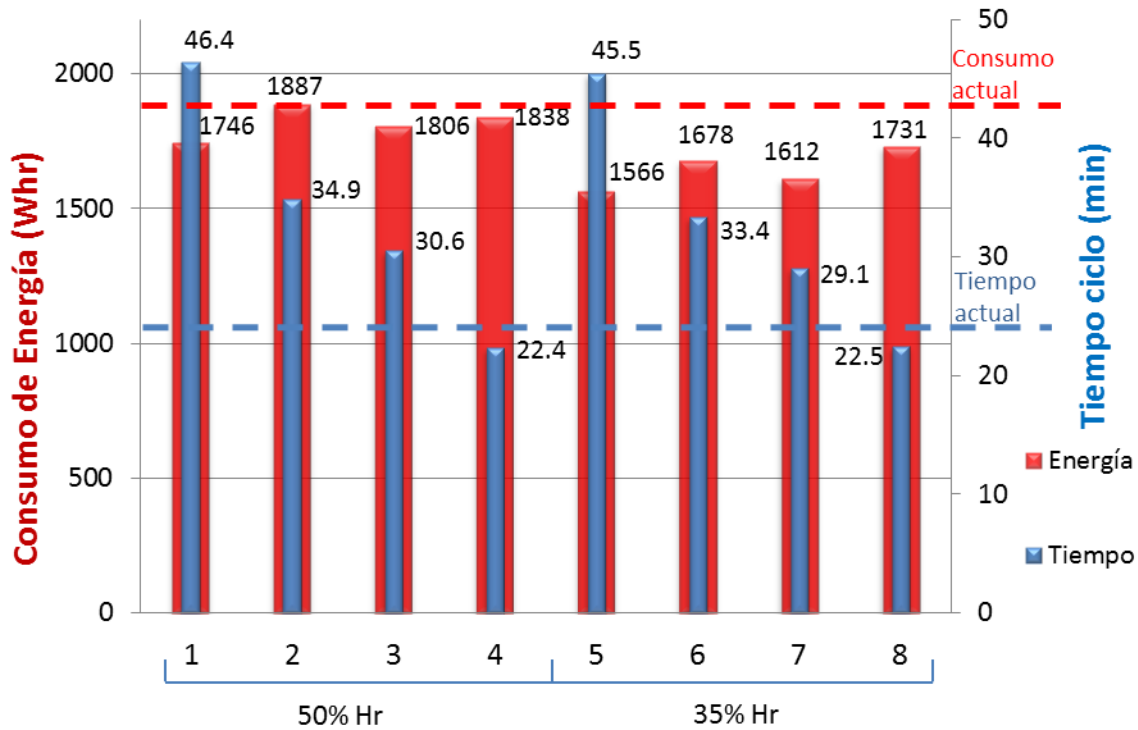


Figura 13. Resultados de las pruebas de secado del DOE.

Si la condición 7 se compara con la 3 (150 CFM, 350 °F y 50% de Hr), es decir, tomando en cuenta solo la disminución de humedad, se puede observar que la prueba 7 consume ~200 W·hr menos sólo por el cambio de humedad. Esto concuerda con el análisis sobre la carta psicrométrica. Para lograr esta disminución de humedad relativa del aire pueden emplearse diferentes conceptos de diseño, por ejemplo a través de sistemas deshumidificantes que emplean un refrigerante o con el uso de materiales desecantes.

Todas las pruebas con excepción de la número 2, presentaron un consumo de energía por debajo del actual, sin embargo la mayoría está por encima del tiempo ciclo actual, no obstante la disminución del consumo de energía tiene una mayor importancia. Con objetivos de diseño no se toma como mejor condición la prueba que presentó menor

consumo de energía (condición 5) si no la que presenta bajo consumo sin castigar mucho el tiempo de secado. La combinación en flujo, temperatura y humedad de la prueba 7 se define como una condición que aporta buenos resultados en eficiencia energética para la secadora de ropa.

4. CONCLUSIONES

A través de este estudio realizado de manera aislada sobre el fenómeno de secado en el tambor de la secadora, se logró identificar y cuantificar la importancia de las variables flujo de aire, temperatura de aire de entrada y humedad relativa del aire de entrada sobre el consumo de energía y tiempo de secado.

Una disminución en la humedad relativa del aire de entrada se ve reflejada en un menor consumo de energía, esto hace que sea la variable más importante en el proceso de secado. Dicha disminución puede lograrse con diferentes conceptos de diseño, por mencionar algunos, sistema deshumidificante con el empleo de un refrigerante o por medio de materiales desecantes.

Se encuentra a la combinación flujo de aire de 150 CFM, temperatura de entrada de 350°F y 35Hr con una aportación del 15% en reducción de consumo energético en la secadora actual. Este valor de temperatura es benéfico para el cuidado de la ropa y el cumplimiento de lineamientos de seguridad.

La variable que más influye en el tiempo de secado es el flujo de aire, sin embargo, flujos de aire muy bajos (por debajo de 100 CFM) y muy altos (por encima de 200 CFM)

no son beneficiosos para el proceso de secado, ya que no ayudan en la transferencia de masa y en la evaporación de humedad respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bansal P, Sharma K, Islam S. Thermal analysis of a new concept in a household clothes tumbler dryer. *Applied Energy*. 2010; 87: 1562-71.
- [2] Deans J, 2001. The modeling of a domestic tumbler dryer. *Applied Thermal Engineering* 21, 977-990.
- [3] Stawreberg L, Berghel J, Renström R. Energy losses by air leakage in condensing tumbler dryers. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 37: 373-79.
- [4] Braun J.E, Bansal P.K, Groll E.A. Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. *International Journal of Refrigeration*. 2002; 25: 954-65.
- [5] Bansal P.K, Braun J.E, Groll E.A. Improving the energy efficiency of conventional tumbler clothes drying systems. *International Journal of energy research*. 2001; 25: 1315-32.
- [6] Bansal P, Sharma K, Islam S. Thermal analysis of a new concept in a household clothes tumbler dryer. *Applied Energy*. 2010; 87: 1562-71.
- [7] Rezk K, Forsberg J. Geometry development of the internal duct system of a heat pump tumble dryer based on fluid mechanic parameters from a CFD software. *Applied Energy*. 2011; 88: 1596-605.

- [8] Tipler Paul A. Física tercera edición. Editorial Reverté, S. A. 1993. Barcelona, España.
- [9] Brenndorfer B, Kennedy L, Oswin Bateman C, Trim D. S, Mrema G. C, Wereko-Brobby C. Solar Dryers-their role in post-harvest processing. Commonwealth Science Council, 1987. Londres, Reino Unido.
- [10] Hernandez E. Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración. Limusa, 2009. México.
- [11] Sosa Griffin M. Ventilación natural efectiva y cuantificable: confort térmico en climas cálidos-húmedos. Gráficas León S.R.L. Caracas Venezuela. 1999.
- [12] Environmental Protection Agency (EPA). ENERGY STAR & Industry Scoping Report residential Clothes Dryers. November 2011.