

Modelo teórico para cuantificar la eficiencia térmica del calentador eléctrico en una secadora doméstica de ropa

Luis Alberto Ruiz¹, Álvaro Sánchez¹, Martín Caudillo¹, Víctor Miranda⁴, Luis Ballesteros⁵

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica

Instituto Tecnológico de Celaya, ruiz_alberto@live.com.mx, alvaro.sanchez@itcelaya.edu.mx,
martin.caudillo@itcelaya.edu.mx

⁴ Equipo de Física Aplicada

Mabe TyP, victor.miranda@mabe.com.mx

⁵ Líder de Subsistema de Física Aplicada

Mabe TyP, luis.ballesteros@mabe.com.mx

Recibido: 06-01-2015. Aceptado después de revisión: 23-08-2015.

Resumen. En este trabajo de difusión se presenta la mejora de la generación y transferencia de calor en el calentador eléctrico de una secadora doméstica de ropa, con el desarrollo de un modelo teórico para estimar la eficiencia térmica, basado en el flujo másico y la potencia eléctrica del calentador como variables de entrada, y la eficiencia térmica del calentador como variable de salida, con el calentador analizado como un componente aislado. Se realizaron pruebas al calentador para determinar la función matemática de su eficiencia térmica. Del análisis de resultados se observó la tendencia exponencial típica de un sistema sobreamortiguado, base del modelo matemático cuyo coeficiente de predicción es 0.96. El modelo matemático se comprobó con flujo másico alto obteniendo un error relativo máximo de 0.66 %, y provee de información suficiente para elevar la eficiencia en 7.7%. El rango de potencia en el que fue probado el modelo matemático desarrollado para el calentador es de 1 KW hasta 5 KW, el cual es el rango recomendado para su uso.

Palabras claves: Modelo teórico, transferencia de calor, secadora de ropa, eficiencia energética.

Abstract. In this research paper, enhancement of generation and transfer heat on a tumbler dryer electric heater is achieved by a developed theoretical model, through the thermal efficiency estimation on the electric heater. Air mass flow and electric power interaction in the heater were used as inputs, and thermal efficiency was defined as the output of the model. It was considered the electric heater as an isolated component. Heater efficiency tests were performed in order to obtain the theoretical-physical correlation. From the obtained results, a typical over-damped system behavior was identified and a mathematical model that follow this trend was proposed. The R square prediction coefficient was 0.96. Finally, the model was evaluated with high air mass flow getting a maximum relative error about 0.66 %, and provides enough information to rise heater thermal efficiency up to 7.7%. The power range for the model to predict efficiency is from 1 KW to 5 KW, the same as the recommended power range for use.

Keywords: Theoretical model, heat transfer, fabric dryer, energy efficiency.

1. Introducción

En este documento se aborda el problema de mejorar las condiciones de generación, transferencia y transporte de calor en el calentador eléctrico de las secadoras domésticas de ropa, con la intención de reducir el consumo de energía en la secadora.

Esta investigación se realiza en un calentador eléctrico de tipo remoto, en una secadora de ropa como la que se muestra en la Figura 1.

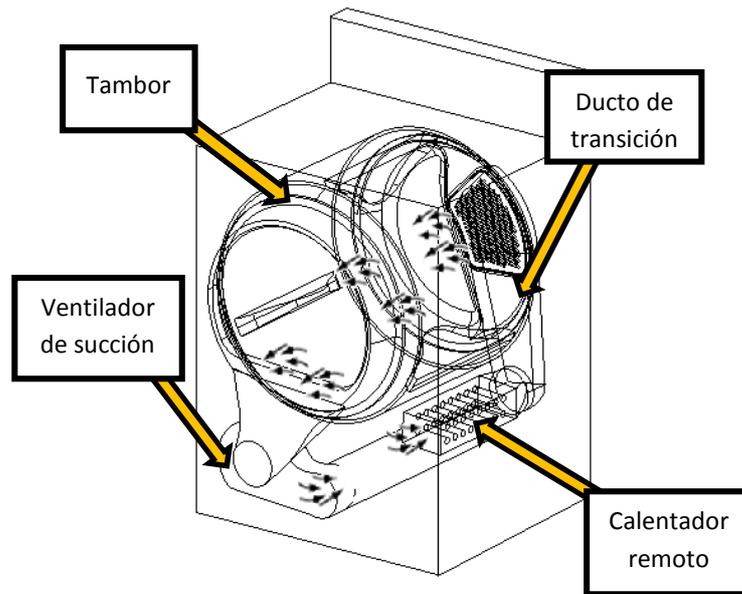


Figura 1. Secadora de ropa con calentador remoto.

En general, la mejora en la eficiencia de la secadora doméstica de ropa puede ser fruto de la mejora del sistema completo o de la mejora de un sistema local considerando todas las variables globales. Por otra parte, el enfoque de este trabajo se dirige a la mejora de un solo componente: la fuente de calor, que es la encargada del consumo de más del 80% de la energía en la secadora, de ahí la importancia para seleccionarlo como componente para ser analizado.

Para lograr la caracterización del calentador se propuso un modelo teórico-experimental, de tal manera que se pueda obtener la eficiencia térmica del calentador a cualquier potencia y flujo másico sin necesidad de evaluar experimentalmente el calentador.

La experimentación y modelo consideran el calentador de la secadora como un componente aislado, de tal manera que pudiera ser examinado sin la influencia de las variables de ruido asociadas al proceso de secado, tales como el incremento en la humedad del aire, el incremento de la temperatura ambiente, y cambios en la resistencia del calentador [1]-[4].

1.1 Fundamentación y justificación

Una secadora eléctrica doméstica de ropa de entre 7 y 7.5 ft³, tiene un consumo anual de energía de por lo menos 967 KWh, que representa el 8.6 % de la energía promedio consumida en un hogar de los Estados Unidos, reducir esta cantidad de energía tiene un aporte directo en la reducción de la creación de nuevas plantas generadoras de energía [1]. Obteniendo un ahorro del 5 % de la energía total consumida por la secadora (lo necesario para cubrir la regulación del departamento de energía que entrará en vigor en 2015 [2]), se ahorran más de 48 KWh por año que equivale a casi 0.5 % del consumo energético en un hogar promedio en los Estados Unidos.

1.2 Revisión de la literatura

Se han realizado ya modelos de la secadora eléctrica doméstica de ropa, el mismo tipo de secadora de la que se modela el calentador en este trabajo de investigación, sin embargo, estos modelos son de la secadora completa, sin tomar el del calentador como componente

aislado. El modelo realizado por Deans [3], es usado para demostrar los efectos de la acumulación de pelusa en la trampa, sobre el desempeño energético de la secadora, y también cuantifica el cambio de rendimiento energético debido al tipo de tela a secar, así enfoca su trabajo en fenómenos alejados de la fuente de calor.

Bansal et. al. con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en la secadora de ropa, estudiaron 4 diferentes tipos de secadora de ropa de donde se concluyó la importancia de recuperar el calor del aire caliente y húmedo de la descarga de la secadora, así mismo, determinaron la influencia de algunas variables manipulables en el proceso de secado tales como la humedad relativa y flujo del aire, sin embargo, estos resultados son para la mejora de los procesos físicos sin ser el calentador eléctrico el objeto de estudio principal [4].

1.3 Objetivo

Desarrollar un modelo matemático que mediante su uso permita incrementar la eficiencia térmica del calentador eléctrico de la secadora doméstica de ropa, a través de la mejora en la generación y transferencia de calor.

1.4 Formulación de Hipótesis

Con base en el balance de energía del calentador eléctrico, véase la Ec. (1), se puede suponer y estimar que existe una zona de saturación en la transferencia de calor por convección al aire tal que la transferencia de calor por radiación y conducción incrementa a partir de ese punto. Dicho punto de saturación ocurre a cierta distancia desde la entrada del calentador eléctrico en dirección del flujo, véase la Figura 2, de tal manera que a diferencia de las primeras espiras, las últimas espiras del calentador aportan menos calor al aire.

$$\dot{Q} = C_p \dot{m} (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

\dot{Q} = Calor transferido al aire.

C_p = Calor específico a presión constante del aire.

\dot{m} = Flujo másico del aire.

T_1 = Temperatura ambiente.

T_2 = Temperatura del aire al salir del calentador.

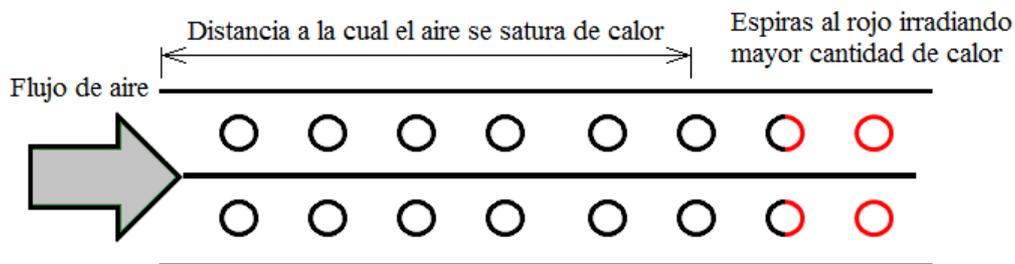


Figura 2. Diagrama de hipótesis del calentador eléctrico actual.

El modelo teórico es la mejor opción para estimar la eficiencia a lo largo del calentador de forma continua, con el fin de realizar una evaluación cuantitativa de la zona de saturación del aire.

2. Materiales, fuentes y métodos

Dado que dentro de la secadora en funcionamiento existen diferentes perturbaciones para el calentador eléctrico, tales como la humedad relativa del aire fuera y dentro del tambor, la temperatura ambiente, la temperatura del aire en el tambor, las infiltraciones de aire y la presencia de pelusa, se ha propuesto cuantificar la eficiencia del calentador remoto, bajo una unidad lineal que minimice las perturbaciones (variables de ruido), al mantener la operación de los calentadores dentro de un rango de prueba, donde se minimiza la influencia de factores externos en su rendimiento.

2.1 Unidad experimental

La unidad experimental consiste en una secadora en la que se removió el tambor y se conectó la salida del ducto de transición de la secadora con el ventilador de succión usando un tubo flexible y sellando todas las conexiones véase Figura 3. Esta configuración garantiza que el calentador se somete al mismo flujo al que se sometería en operación normal, pero sin la presencia de entradas de aire que alteren en determinado momento el flujo que circula por el calentador. Las pruebas realizadas con esta unidad experimental ocurrieron en un ambiente con humedad y temperatura controlada.

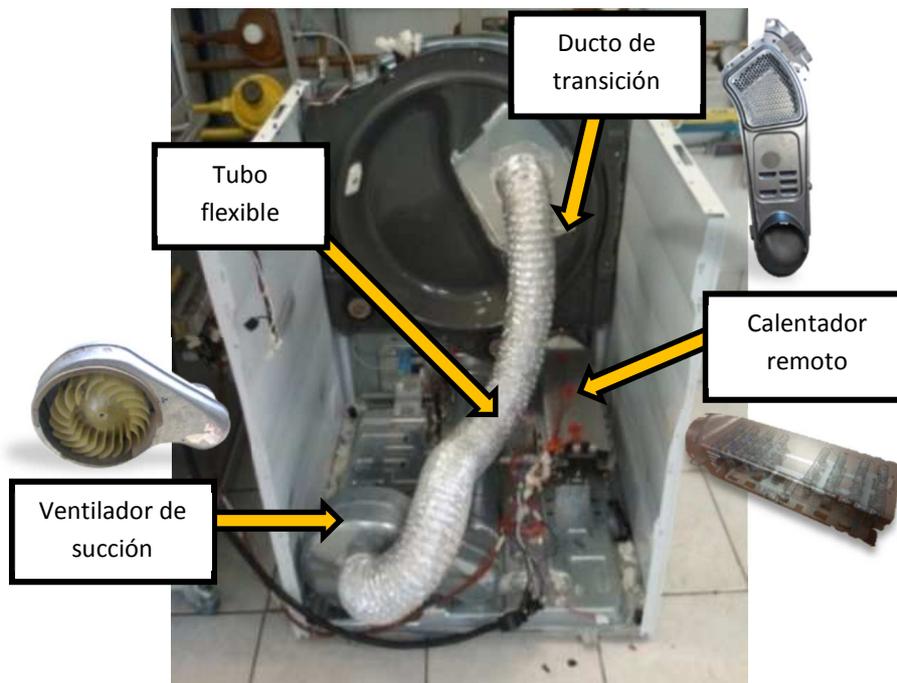


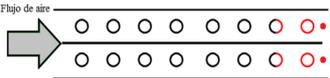
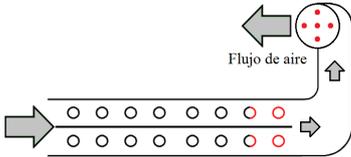
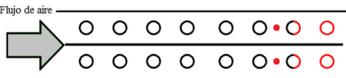
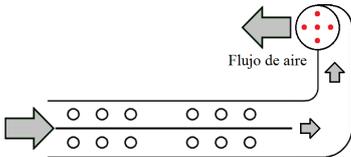
Figura 3. Unidad Experimental.

Las experimentaciones se realizaron con un flujo volumétrico constante de $6.277 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sin embargo, es de notarse que el flujo másico de aire cambiará dependiendo de la temperatura del aire calentado.

2.2 Consideraciones en la experimentación.

Para evitar la influencia de la radiación sobre los termopares, se utilizó una configuración equivalente para la medición de la temperatura, véase la Tabla 1, en donde solo se muestran dos configuraciones equivalentes (para 8 y 6 pares de espiras) de las cuatro que fueron usadas (8, 6, 4 y 2 pares de espiras) [5], [6].

Tabla 1. Configuraciones equivalentes de medición de temperatura (puntos rojos indican termopares).

Pares calentando	Configuración ideal	Configuración propuesta equivalente
8		
6		

Para lograr las configuraciones equivalentes de la Tabla 1, se modificó el calentador eléctrico retirándole pares de espiras y a la vez también disminuyendo su resistencia, véase la Figura 4.

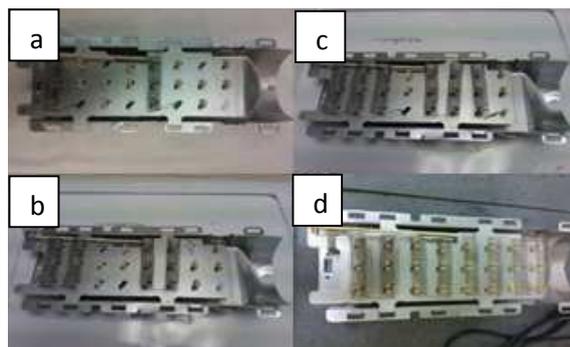


Figura 4. Calentador eléctrico con a) 2 pares de espiras, b) 4 pares de espiras, c) 6 pares de espiras y d) 8 pares de espiras.

Como la resistencia eléctrica del calentador se reduce, se tiene que reducir también el voltaje de alimentación para controlar la potencia que disipan los pares de espiras, que aún quedan en funcionamiento. En la Tabla 2 se muestra la referencia de valores de voltaje, corriente y potencia para las pruebas aplicadas al calentador con 8, 6, 4 y 2 pares resistivos en operación. Las pruebas en rojo, son irrealizables debido a que la corriente que circula por el alambre resistivo excede la corriente máxima permisible, $I_{max} = 35$ A. Las pruebas en verde y magenta se realizan para obtener el modelo matemático, capaz de estimar la zona de saturación con el flujo volumétrico actual del calentador.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del calentador en cada prueba.

Pares activos	100% [5000 W]	75% [3750 W]	50% [2500 W]	25% [1250 W]
8	V=240 V I=20.83 A	V=208 V I=18.04 A	V=170 V I=14.73 A	V=120 V I=10.42
6	V=208 V I=24.06 A	V=180 V I=20.83 A	V=147 V I=17.01 A	V=104 V I=12.03 A
4	V=170 V I=29.46 A	V=147 V I=25.52 A	V=120 V I=20.83 A	V=85 V I=14.73 A
2	V=120 V I=41.67 A	V=104 V I=36.08 A	V=85 V I=29.46 A	V=60 V I=20.83 A

Las pruebas en azul y magenta son para obtener un modelo general del calentador, que permita conocer la mejor condición de operación en términos de la potencia y el flujo másico, como variables independientes.

3. Resultados

Los dos modelos obtenidos se diferencian principalmente en la aplicación y la operación del calentador en cada uno, mientras que el modelo que corresponde a la Figura 5 (pruebas en verde y magenta en Tabla 2) se usa para determinar las pérdidas de calor por cada par de espiras y la caída en la eficiencia a lo largo del calentador, para así estimar la zona de saturación de calor del aire, el modelo de la Figura 6 se usa como guía de diseño para los futuros calentadores, pudiendo determinar la mejor eficiencia a partir de un valor de flujo másico de aire y de potencia eléctrica del calentador.

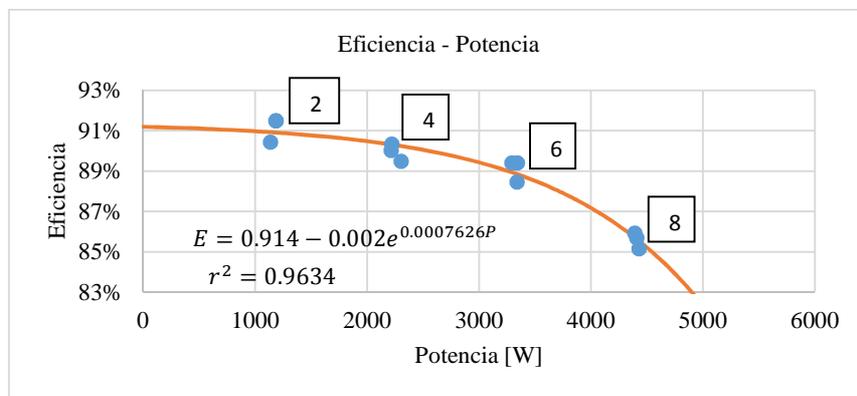


Figura 5. Modelo de calentador a flujo volumétrico constante.

En la gráfica de la Figura 5 se identifica con un número la cantidad de pares en operación por prueba, correspondiente a cada cúmulo de puntos.

Del modelo de la Figura 5 se obtiene que la mayor caída de la eficiencia se da a partir del sexto par de espiras, por lo que ahí es donde se define el inicio de la zona de saturación de calor en el aire.

Para obtener el modelo de la Figura 6 y Figura 7 se calculó un rango de flujo másico teórico a partir del rango de potencia en las pruebas realizadas con el calentador de 8 pares de espiras funcionando.

La gráfica de la Figura 6, es una representación de la curva de nivel para $P = 4500$ W de este modelo del calentador, y en la Figura 7 se observa la superficie que describe.

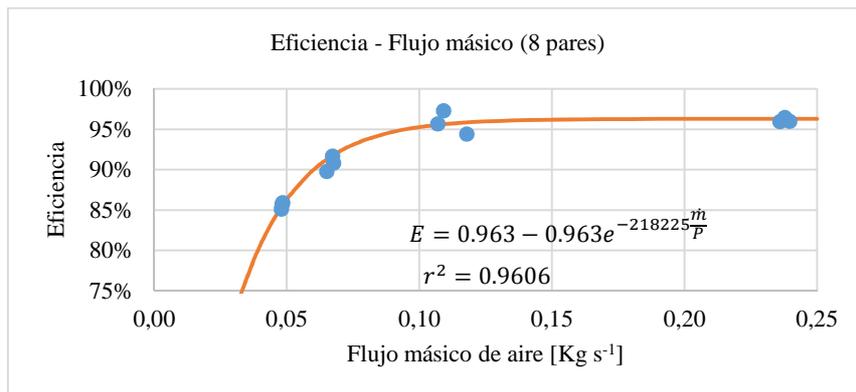


Figura 6. Curva de nivel de modelo del calentador ($P = 4500 \text{ W}$).

Del modelo se puede observar que existen infinitas combinaciones entre potencia y flujo másico de aire para alcanzar una alta eficiencia en el calentador (mayor al 91%), desde la zona amarilla y por toda la zona azul, sin embargo todas las opciones involucran un incremento en el tiempo de secado debido a que se tiene que disminuir la potencia del calentador y/o incrementar el flujo másico del calentador. [3], [7].

En términos generales, el modelo del calentador eléctrico para la eficiencia obtenido a partir del análisis de resultados de las pruebas y la revisión de la teoría relacionada es el de la Ec. (2).

$$E = a_1 - a_2 e^{-a_3 \frac{m}{P}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

E = Eficiencia energética del calentador.

a_1 = Coeficiente de máxima eficiencia del calentador.

a_2 = Coeficiente experimental de eficiencia.

a_3 = Coeficiente experimental de eficiencia.

La constante a_1 está definida por la máxima eficiencia del calentador, a_2 tiene un valor máximo igual a a_1 , pero al igual que a_3 , disminuye conforme aumenta la densidad de potencia. Solo las constantes a_1 y a_2 son adimensionales, la constante a_3 tiene unidades [J Kg^{-1}]. Para el calentador aquí caracterizado las constantes son las que definen el modelo de la Figura 6.

Adicionalmente a las pruebas realizadas para obtener el modelo matemático, se realizaron pruebas de comprobación con flujo másico alto igual a $0.05108 \text{ Kg s}^{-1}$, con las que se determinó un error relativo máximo de 0.66 %, que corresponde con la prueba de potencia 4726 W y eficiencia de 87.8 %.

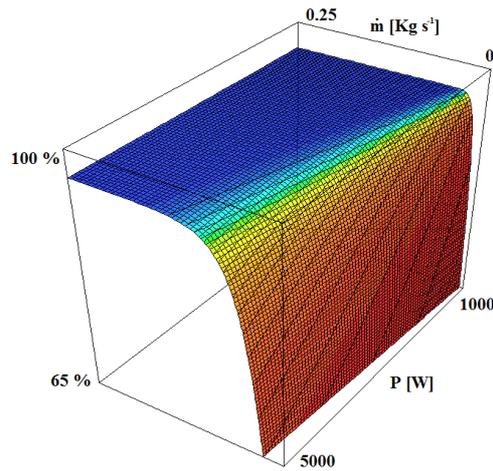


Figura 7. Gráfica del modelo desarrollado para el calentador actual.

4. Conclusiones

El calentador eléctrico que actualmente opera al 83.3% de eficiencia, puede funcionar con un mayor aprovechamiento de la energía, disminuyendo su potencia de operación o incrementado el flujo másico de aire que circula a través de él. Del modelo obtenido se puede concluir que si se quiere operar en las mejores condiciones se debe de considerar el 91 % de eficiencia que es a partir de donde la eficiencia empieza a disminuir sustancialmente. Según los resultados de este estudio, una eficiencia del 91 % se alcanza de tres formas: La primera es incrementando el flujo volumétrico de aire hasta los $7.780 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y manteniendo la potencia eléctrica actual del calentador, que es 4408.3 W, La segunda forma es manteniendo el flujo volumétrico actual de $6.367 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y disminuyendo la potencia del calentador a 3575 W, la tercera forma es variando ambas magnitudes, en el intervalo cerrado de potencias igual a [3575 W, 4408.3 W] y de flujos másicos [$6.367 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $7.780 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$].

El camino del modelado de la eficiencia de cada subproceso involucrado en el secado de ropa, es un camino seguro para encontrar la eficiencia global de todo el secado, desde que se puede encontrar el punto de intersección de todas las funciones que modelen los subprocesos y así tener la certeza de que se ha encontrado la mejor condición posible de operación de todas las partes involucradas.

Este trabajo de investigación fue pensado para obtener solo la mejor condición de operación del calentador eléctrico, y con el modelo desarrollado se alcanzó el objetivo. Y, si bien es útil para el propósito que fue desarrollado, puede ser mejorado con la obtención de expresiones que expliquen el valor de los coeficientes en términos de parámetros que eliminen la necesidad del sistema en operación para ser determinadas.

Referencias

- [1] Department Of Energy, «Test procedures For Residential Clothes Dryers: Final Rule», Disponible en: www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/pdfs/clothes_dryer_tp_final_rule.pdf, [Online], Marzo 2013.
- [2] Department Of Energy, «ENERGY STAR Market & Industry Scoping Report Residential Clothes Dryers», Disponible en: http://www.energystar.gov/ia/products/downloads/ENERGY_STAR_Scoping_Report_Residential_Clothes_Dryers.pdf, [Online], Noviembre 2011.
- [3] J. Deans, «The modeling of a domestic tumbler dryer», *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, pp. 977-990, 2001.
- [4] P. Bansal, J. Braun y E. Groll, «Improving the energy efficiency of conventional tumbler clothes drying systems», *International Journal of Energy Research*, vol. 25, pp. 1315-1332, 2001.

[5] R. Bird, *Fenómenos de transporte*. Limusa Wiley, 2006.

[6] Y. Cengel, *Transferencia de Calor*. McGraw-Hill, 2005.

[7] L. Rojas, L. Ruiz, L. Alcaraz, F. Sosa y L. Ballesteros, «Identificación de variables que impactan en la Eficiencia Energética de Secadoras de ropa», *Pistas Educativas*, vol. 103, pp. 259-277, 2013.