

Desarrollo de un modelo experimental para cuantificar eficiencia térmica en calentadores eléctricos

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 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

Álvaro Sánchez Rodríguez

Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya
alvaro.sanchez@itcelaya.edu.mx

Victor Miranda Razo

Grupo de Física Aplicada de Mabe Tecnología y Proyectos
victor.miranda@mabe.com.mx

Luis Ballesteros Martínez

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

Resumen

El presente trabajo de difusión centra su atención en mejorar los mecanismos de generación, transferencia y transporte del calor, producido por un calentador eléctrico para secadoras domésticas de ropa y así mejorar su eficiencia. Se realizó un análisis funcional de los procesos que intervienen en la operación de la secadora, la delimitación de la influencia del calentador y la modelación experimental (prototipo funcional, mediciones de temperatura y consumo energético a diferentes configuraciones de diseño). Se generaron configuraciones de diseño a través del conocimiento básico de la teoría de la transferencia de calor. De las evaluaciones

realizadas de las configuraciones de arreglos resistivos se determinó la influencia de cada segmento de alambre resistivo del calentador eléctrico en la generación de calor en la secadora, en donde se observó un comportamiento lineal en la temperatura del aire a lo largo del calentador, no así en la transferencia de calor, en donde se identificó una oportunidad de mejora de hasta 13.2% en la eficiencia del calentador.

Palabras Clave: Secadora de ropa, fuente de calor, resistencia eléctrica, transferencia de calor.

1. Introducción

Las secadoras domésticas de ropa tradicionales de ciclo abierto, usan dos tipos de fuentes de calor: eléctrica y de combustión. Dado que existe el problema de pérdidas de calor en ductos que conectan la fuente de calor con el tambor donde se encuentra la ropa, se ha ubicado en secadoras actuales el calentador eléctrico justo detrás de la entrada del tambor, con la intención de reducir las pérdidas de calor en los ductos.

Existen dos tipos de fuentes de calor eléctricas en la secadora doméstica de ropa, el calentador remoto y el calentador posterior, véase la Figura 1. La versatilidad de una fuente de calor eléctrica le permite situarse incluso detrás de la entrada del tambor a diferencia de la fuente de calor por combustión la cual se encuentra en la base de la secadora. Este trabajo se enfoca en el concepto conocido como calentador eléctrico remoto, con el objetivo de modelar su funcionamiento de forma experimental para reducir la temperatura superficial de los metales que lo rodean, y mejorar su funcionamiento para la disminución de consumo energético.

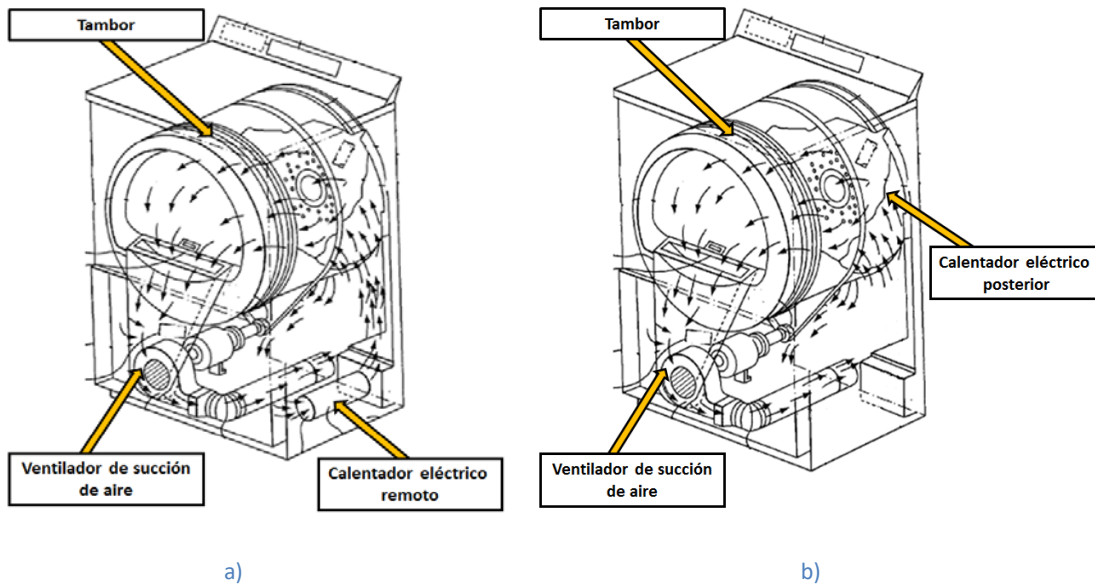


Figura 1. Representación a) de una secadora de calentador remoto y b) de calentador posterior.

La evaluación de los prototipos de este concepto se llevó a cabo con pruebas personalizadas desarrolladas sobre una plataforma que focaliza la atención en los resultados de desempeño únicamente del calentador eléctrico minimizando perturbaciones.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos establece que las secadoras domésticas de ropa, deben cumplir con una mayor eficiencia para los próximos años, [3]. El trabajo documentado en este artículo, obedece a la evaluación realizada a los prototipos de calentadores para el concepto de calentador eléctrico remoto con el fin de cumplir con este requerimiento.

Varios trabajos se han realizado en el marco de la mejora de la eficiencia en la secadora de ropa, autores como Bansal et al. [4], han propuesto mejoras en la eficiencia de la secadora doméstica de ropa a través de conceptos de recuperación de calor, basados en la mejora de todo el sistema. Esta mejora solo se logra con la

modelación del sistema entero. Asimismo, autores como Deans [5] han dirigido sus esfuerzos al modelado de la secadora entera, con el fin de que sea usado como una herramienta de diseño.

En general, el enfoque hacia la mejora en la eficiencia de la secadora doméstica de ropa está basada en la mejora del sistema completo o en 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.

Los principales fenómenos de transferencia de calor en el calentador son la transferencia por convección y la transferencia por radiación.

Dado que en la secadora el aire es forzado a fluir sobre la superficie de la resistencia eléctrica y a través de los ductos, el tipo de convección que está presente es la convección forzada.

La experiencia muestra que la transferencia de calor por convección depende en gran medida de las propiedades del fluido: viscosidad dinámica(μ), conductividad térmica(k), densidad(ρ), y calor específico(C_p), así como también la velocidad del fluido(v). También depende de la geometría y la rugosidad de la superficie sólida. Adicionalmente, depende también del tipo de flujo del fluido, es decir, si es laminar o turbulento. [1].

Las propiedades del fluido y su flujo se engloban en el coeficiente de transferencia de calor por convección(h), y es hA_s la proporción en la que varía el flujo de calor

convectivo respecto de la diferencia de temperatura entre la superficie del sólido T_s y la del fluido T_∞ . [1].

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad \text{Ec. 1}$$

La transferencia de calor por radiación en la secadora se presenta en su parte más importante en la resistencia eléctrica del calentador. El elemento resistivo generador de calor en la secadora es un cuerpo opaco, de manera que solo la radiación emitida por las moléculas en la superficie puede escapar del sólido. La cantidad de energía de irradiada en este caso sería determinada por la Ecuación 2

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad \text{Ec. 2}$$

1.1. Generación de calor por el fenómeno resistivo de calor.

En un alambre conductor, la intensidad de la corriente es proporcional a la diferencia de potencial que existe entre los extremos de dicho alambre. Esto se traduce en la Ecuación3:

$$I = \left(\frac{1}{R}\right)V, \text{ es decir } R = \frac{V}{I} \quad \text{Ec. 3}$$

La relación de la Ecuación 3 conocida como Ley de Ohm, refiere que al aplicar una diferencia de potencial a un alambre conductor, la corriente eléctrica que circula a través de ella depende del potencial y de la resistencia del mismo conductor. [2].

De forma general, cuando fluyen cargas en el interior de un conductor, la carga pierde energía potencial (caída de voltaje). Esta pérdida de energía potencial aparece como energía cinética de los portadores de carga solo momentáneamente antes de

transferirse a los iones de la red por los choques de los portadores, esto es, se convierte en energía térmica del conductor.

El fenómeno de la disipación de la energía eléctrica en un conductor como energía térmica se traduce mediante la analogía de la Figura 2 en un sistema mecánico, en donde se hacen equivalentes las cargas que circulan a través de un material conductor con balas de acero que bajan por un plano inclinado con obstáculos contra los que chocan, produciendo calentamiento como una forma de liberar esa energía.

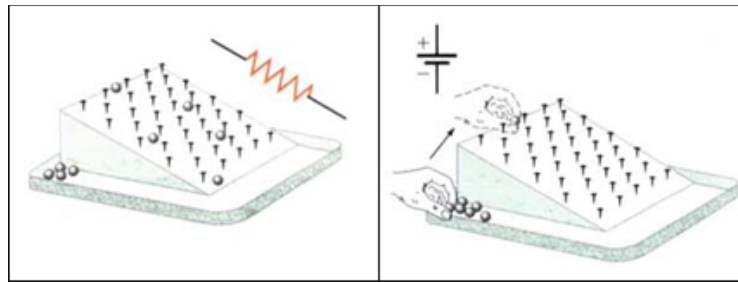


Figura 2. Analogía mecánica para una resistencia eléctrica y una FEM, imagen tomada de [2].

La cantidad de energía que se disipa como energía térmica por unidad de tiempo se obtiene con la Ecuación 4.

$$P = IV \quad \text{Ec. 4}$$

La Ecuación 4 indica que la energía perdida por unidad de tiempo (medida en Watts) es igual al producto de la disminución de la energía potencial por unidad de carga (medida en Volts) por la carga que fluye por unidad de tiempo (medida en Amperes).

2. Cuantificación de la eficiencia térmica en el calentador eléctrico remoto

2.1. El calentador eléctrico remoto.

Como parte del desarrollo del modelo experimental, uno de los parámetros que se deben alcanzar es la temperatura del aire que pueda entregar el calentador eléctrico, basándose en la temperatura del aire a la entrada del tambor que es la requerida para garantizar el mismo desempeño de la secadora.

Por lo anterior, uno de los criterios de aceptación de un calentador eléctrico es la transferencia de calor hacia el aire de entrada al tambor, que actualmente puede elevar la temperatura del aire en alrededor de 200 °F, con un flujo de aire de 150ft³/min.

El concepto actual de calentador usado por la secadora es un calentador resistivo en forma de tira laminar conocida como 'ribbon' (cinta), véase Figura 3 a). Por su parte el concepto de calentador en evaluación utiliza un elemento resistivo en forma de alambre enrollado conocido como 'coil' (espira), véase Figura 3 b).



Figura 3. Conceptos de calentadores, a) Posterior, b) Remoto.

2.2. Desarrollo de prototipo de prueba para evaluación del modelo experimental

Dado que en el proceso de secado dentro de la secadora se tienen diferentes variables asociadas a fenómenos de perturbación del funcionamiento del 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 un modelo lineal que minimice las perturbaciones indeseables (variables de ruido), al mantener la operación de los calentadores dentro de un rango de prueba, donde no puede ser afectado su rendimiento por factores externos.

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 ducto flexible y sellando todas las conexiones véase Figura 4. 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.

Para medir la temperatura y el consumo energético del modelo, se usó un banco de pruebas adquirido en la empresa de las estancias de residencia donde se desarrolla el proyecto, véase Figura 5. Este banco de pruebas cuenta con 15 canales de medición de temperatura usando termopares, 9 de tipo J y 6 de tipo k, cuenta también con

medidores de corriente y voltaje sobre la alimentación de la carga eléctrica (en este caso el modelo).

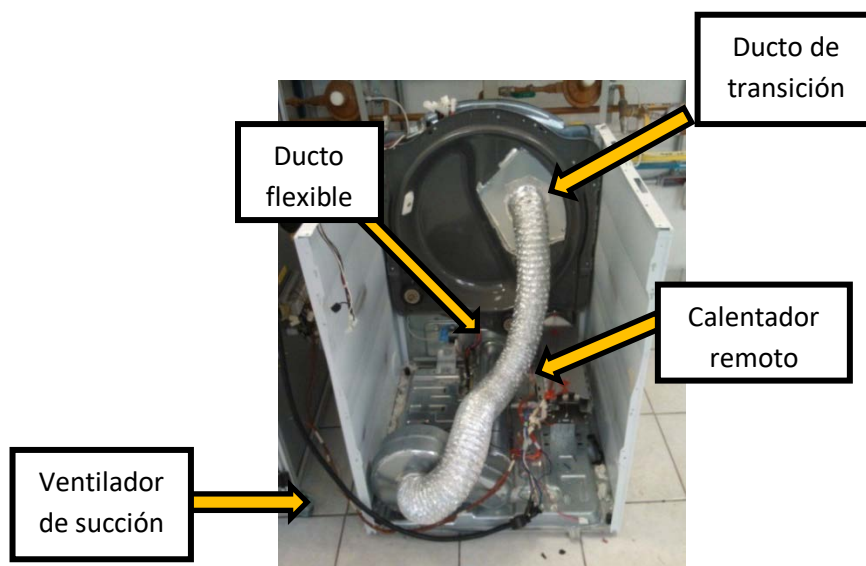


Figura 4. Prototipo del modelo experimental.



Figura 5. Banco de pruebas conectado al modelo experimental.

2.3. Configuración experimental del modelo

Dado que el alambre resistivo del calentador mantiene la misma densidad de potencia a lo largo de todo el calentador, es posible que a lo largo del calentador incrementen las pérdidas por radiación al verse atenuada la transmisión de calor por convección. El

experimento desarrollado permite conocer la cantidad de calor que puede ser transferida al aire en términos de su incremento de temperatura.

Las mayores pérdidas por radiación suelen ser asociadas con un brillo en el alambre resistivo, véase la Figura 6, que indica pérdidas por radiación no solo por energía irradiada en el rango del espectro no visible (infrarrojo) sino también por energía irradiada en el espectro visible.

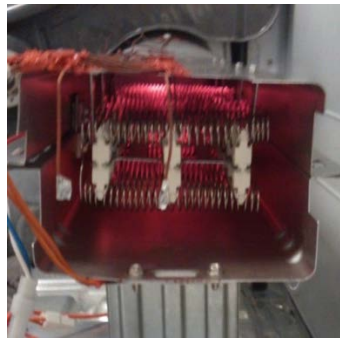


Figura 6. Energía irradiada por el calentador en el rango del espectro visible.

Para conocer el aporte que tiene el calentador y cada parte de él, se definió medir la temperatura del aire después de cada bloque de espiras del alambre resistivo, 8 bloques en total, cada bloque consta de un par de espiras en arreglo vertical, véase Figura 7.

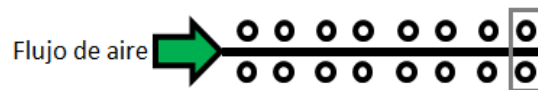


Figura 7. Diagrama lateral de un calentador remoto, los dos círculos encerrados en un rectángulo, representan un par de espiras en arreglo vertical.

Instrumentar para medir la temperatura del aire entre espiras, representaría una medición con valores alterados por la influencia de la radiación sobre los termopares, para evitar este efecto se tendrían que aislar los termopares de manera tal, que el

efecto de la radiación fuera mínimo. Para evitar el aislamiento y aún obtener los valores de temperatura en el aire, se estableció medir la temperatura del aire a la salida del calentador conectando todos los pares (ocho), seis, cuatro y dos, una configuración cada vez, esto sería el equivalente a medir la temperatura del aire a la salida del calentador, entre los pares de espiras 6 y 7, 4 y 5 y 2 y 3 respectivamente, y una medida muy aproximada de la magnitud requerida ya que las pérdidas serían aproximadamente las mismas en todas las mediciones. Las diferentes configuraciones de espiras en el calentador se muestran en la Figura 8.

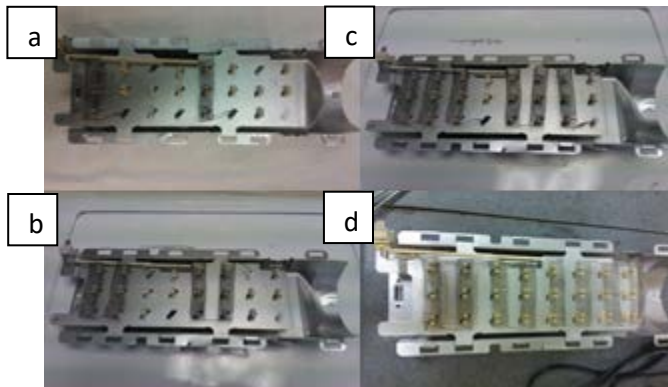


Figura 8. Configuración del calentador para evaluar el aporte de calor al aire por convección en diferentes etapas del calentador con a) dos pares, b) cuatro pares, c) seis pares, d) ocho pares.

Como ya se mencionó se midió la temperatura a la salida del calentador situando los termopares en el ducto de transición, véase Figura 9. Este ducto conecta el calentador eléctrico con el ducto flexible en el prototipo.



Figura 9. Instrumentación del ducto de transición.

La medida de temperatura para ambos termopares se toma referenciada a la temperatura de entrada o temperatura ambiente, por lo que la variable de temperatura medida es en realidad un diferencial de temperatura.

3. Resultados

Producto de la medición de las temperaturas para las diferentes configuraciones del calentador se tomaron los resultados que pueden observarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de las mediciones de temperaturas del aire para diferente número de espiras en funcionamiento.









PARES DE ESPIRAS	[°C]		[V]	[A]	[W]	\dot{Q} [W]	Eficiencia [%]
	ΔT IN	ΔT OUT					
2	25.6	22.9	60.7	19.2	1164.8	1087.7	93.38
4	53.5	48.2	116.8	19.3	2249.7	2137.4	95.01
6	77.0	70.8	171.6	19.3	3306.3	2862.4	86.57
8	105.8	96.1	229.7	19.4	4456.2	3644.1	81.78

En la Tabla 1 se puede apreciar claramente que la diferencia de temperatura entre cada bloque de pares de espiras es aproximadamente la misma, lo cual indica un comportamiento lineal en el incremento de la temperatura del aire a lo largo del calentador, sin embargo, la cantidad de calor transferida al aire no se mantiene

constante. Esto indica que aunque la temperatura es constante para cada arreglo de espiras, el aporte de calor cambia por la masa de aire que alcanza esa temperatura. Esto se debe al cambio de densidad del aire al ser calentado.

A fin de comparación con el calentador completo, se incluyen los resultados de una evaluación del calentador operando con todas las espiras pero con diferentes niveles de voltaje de alimentación (4 niveles), calculados con el fin de obtener el mismo consumo de energía por unidad de tiempo que su equivalente del modelo con solo algunos pares de espiras en operación. La Tabla 2 muestra más claramente la comparación.

Tabla 2. Comparación de un calentador funcionando con todas las espiras disipando la misma energía que su equivalente de menor cantidad de espiras.

Configuración		Configuración	
	1111.7 W 109.8 V 114.7 °F		1164.8W 60.7V 116.2°F
	2246.9 W 158.6 V 163.8 °F		2249.7W 116.8V 161.8°F
	3349.89 W 196 V 213.1 °F		3306.3W 171.6V 202.4°F
	4332 W 224 V 260.4 °F		4456.5W 229.7V 248°F

La Tabla 2 muestra claramente los mismos niveles de potencia para el calentador completo y su equivalente en número reducido de espiras, el comportamiento es prácticamente el mismo (lineal) manteniendo la misma temperatura del aire y la misma caída de eficiencia (de hasta 13.2%) de la máxima potencia respecto de la menor.

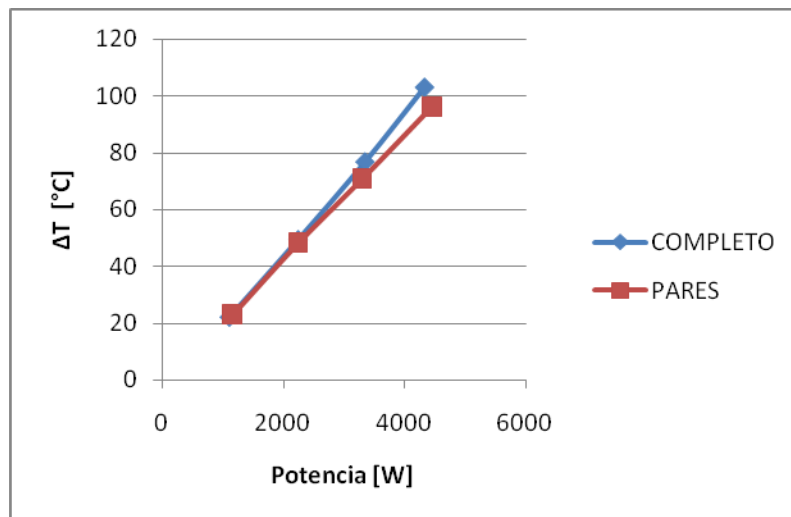


Figura 10. Comparativo de la temperatura del aire entre ambos arreglos de calentador a cuatro etapas de potencia.

4. Conclusiones

La unidad experimental usada para validar el modelo experimental permitió determinar la equivalencia en desempeño entre un calentador completo, y un calentador de menor número de espiras lo que sugiere que a pesar de la diferencia en la densidad de potencia del calentador, la eficiencia del calentador en ambos casos es prácticamente la misma en los cuatro niveles de potencia, con la mayor eficiencia en 4 pares de espiras correspondiente a 2250W con 95%, aunque con una caída de hasta 13.2% al usar 8 pares de espiras. Por tal razón se puede afirmar que construir un calentador más corto mantendría el mismo desempeño en la secadora, con un posible ahorro en costo. Evidentemente, dado que el costo de un elemento resistivo depende de su material y calibre, acortar el calentador incrementará el diámetro del alambre, esto incrementa también su precio. Es posible que dicho incremento en precio, se pueda ver compensado con el ahorro de material en la placa de sujeción y carcasa del calentador.

Referencias

- [1] Cengel Yunus A., "Transferencia de calor", Segunda edición
- [2] Tipler Paul A., "Física" Tercera Edición. Barcelona, España. Editorial Reverté 1993
- [3] "ENERGY STAR Program requirements Product Specification for Clothes Washers Eligibility Criteria, final draft versión 6.0."
https://www.energystar.gov/products/specs/system/files/ENERGY_STAR_Final_Draft_Version_6.0_Clothes_Washer_Specification.pdf
- [4] Bansal P. K., Braun J.E., Groll E.A., 2001. "Improving the energy efficiency of conventional tumbler clothes drying systems". International Journal Of Energy Research 25:1315-1332
- [5] Deans J., 2001. "The modeling of a domestic tumbler dryer". Applied Thermal Engineering 21:977-990.