Análisis de los parámetros del diseño en aletas para disminuir la temperatura en sistemas mecatrónicos.

Ortega Herrera Francisco Javier, García Guzmán José Miguel, Torres Jiménez Jacinto

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Carretera Irapuato—Silao km. 12.5, El Copal, C.P. 36821, Irapuato, Guanajuato, México.

Resumen

El presente trabajo estudia los efectos en la efectividad de las aletas, la eficiencia térmica y la transferencia de calor considerando la variación del número, el espesor y la separación de las aletas en un arreglo rectangulares. Se presentan graficas de los resultados, posteriormente se obtienen mediante el método de mínimos cuadrados ecuaciones que se ajusten a los resultados. Para la eficiencia térmica se obtienen ecuaciones polinómicas de cuarto orden, para la transferencia de calor se obtienen ecuaciones lineales finalmente para la efectividad se obtienen una ecuación polinómica de cuarto orden todas con un valor de $R^2=0.99$. Por tanto las ecuaciones obtenidas se ajustan fuertemente a los resultados calculados. Los resultados muestran que al disminuir el número y aumentar el espesor de las aletas la eficiencia térmica crece, mientras que al aumentar el número y espesor de las aletas la transferencia de calor crece, finalmente la efectividad de las aletas disminuye al aumentar su espesor.

<u>Palabras clave:</u> Aletas, Eficiencia, Superficies extendidas, Disipadores de calor

1. Introducción

Cualquier sistema mecatrónico tiene entre sus componentes circuitos eléctricos y electrónicos, uno de los mayores problemas que presentan estos circuitos es la alta temperatura que pueden alcanzar debido al paso de la corriente eléctrica por ellos. El aumento de temperatura afecta su funcionamiento de forma considerable. Por tanto uno de principales problemas que hay que resolver es la disipación de la energía presente en forma de calor para poder disminuir la temperatura de operación de los dispositivos eléctricos y electrónicos y de esta forma aumentar su desempeño. Cuando estos dispositivos manejan pequeñas señales la temperatura no es muy considerable y puede ser disipada con facilidad a través de la superficie que forma dicho dispositivo.

Sin embargo, cuando los dispositivos manejan grandes potencia, la potencia disipada se eleva considerablemente y con ello la temperatura del dispositivo. La solución más comúnmente utilizada para disipar el calor es la utilización de disipadores de calor conocidos también como superficies extendidas o aletas.

Marín J. [1] comenta que existe una gran necesidad en determinar de una forma cuantitativa la efectividad en que los circuitos electrónicos disipan el calor generado durante su funcionamiento. Este autor desarrolla un prototipo para medir mediante calorimetría directa la disipación de calor de los circuitos electrónicos. Por su parte Correa R., Reyes O., y Marín J., [2] desarrollan una investigación experimental para determinar la eficiencia térmica de un tubo para la transferencia de calor (TPTC o heat pipe) y la comparan con los elementos comúnmente utilizados para disipar calor en un circuito, esto es, un ventilador y una aleta, mencionan que en todos los experimentos el TPTC, tuvo la menor eficiencia térmica, aunque tiene la ventaja de ser pasivo, poseer un pequeño volumen y carecer de partes móviles. Marín J., Tibaduiza D. y Correa R. [3] describen un calorímetro utilizado para la determinación experimental de la cantidad de calor generado por circuitos electrónicos con la particularidad de permitir la entrada de potencia eléctrica al circuito electrónico bajo ensayo, para poder hacer seguimiento de su dinámica de generación de calor por efecto Joule.

Girón B, Hernández A., Rubio C., Hilda R., [4] realizan una conjunción del estado del arte de investigaciones analíticas técnicas, experimentales y numéricas de los tipos de aletas y arreglos geométricos más usados. Mientras que Zúñiga, Hernández, Rubio y Solorio [5] realizan un análisis donde reportan el campo de presión y la resistencia térmica global como una función del número de Reynolds y de la altura del canal. En al análisis se determinan las pérdidas de presión entre la entrada y la salida del disipador, así como la caída de presión global dentro del disipador. Los resultados que

obtienen indican una buena similitud entre las predicciones de temperaturas basadas en el modelo y los datos experimentales a velocidades altas, sin embargo se encuentra una notable diferencia para velocidades bajas.

Carvajal I., Sánchez F., Cruz J., Núñez E. y Abugaber J., [6] comparan la eficiencia térmica de tubos aletados inclinados y tubos con aletas inclinadas un ángulo de 45°, obteniendo una correlación para el cálculo de transferencia de calor del tipo $Nu=f(Re^n)$, comparando los resultados con los obtenidos por otros autores en un tubo inclinado 40° con respecto a la dirección del flujo, concluyendo que los tubos con aletas inclinadas tienen una eficiencia térmica mayor de hasta un 75%. Por su parte, Carvajal I., Sánchez F., Cruz J. y Tolentino R. [7] presentan resultados experimentales de la transferencia de calor y la caída de presión en una superficie extendida compuesta de tubos con aletas cónicas. Investigan dos arreglos, en triángulo equilátero y en triángulo isósceles, compuestos de 9 tubos con aletas cónicas en 45º respecto del eje axial. Los autores comentan que el arreglo en triángulo isósceles tiene una caída de presión mayor de hasta un 25% que la presentada por el arreglo en triángulo equilátero, para un mismo valor del coeficiente de convección externo.

Obregón S., Molina V. y Salvo N., [8] presentan los resultados obtenidos de simulaciones realizadas en sistemas donde la convección natural es el principal mecanismo de transferencia de energía. Los autores estudian geometrías sencillas y aplican los resultados a superficies extendidas, presentando los valores de temperaturas y vectores velocidad para los casos estudiados.

Gil L., [9] caracteriza experimentalmente un intercambiador de calor del tipo gas-liquido con una superficie extendida de tubos con aletas cónicas, estudia dos tipos de arreglos entre tubos, uno en forma equilátero y otro en triangulo isósceles. Por su parte Basualdo J. [10] presenta resultados experimentales para la determinación de la resistencia térmica por contacto que se lleva a cabo en dos tubos aletados, uno de cobre y el otro de aluminio, ambos con aletas de aluminio tipo L.

López y Bautista [11] determinan la eficiencia de una aleta con conductividad térmica variable, mediante el método de perturbación homotópica, esto lo hacen resolviendo la ecuación diferencial no lineal que describe la variación de la temperatura en una aleta con conductividad térmica variable. Mientras que Argumedo P. [12] realiza un análisis numérico

del proceso de transferencia de calor por convección natural de una superficie vertical con aletas inclinadas, comenta que la disposición geométrica de las aletas, el material de la misma y el tipo de fluido de trabajo son determinantes para mejorar la transferencia de calor, además mencionan que existe una relación entre las fuerzas de flotación del fluido y el gradiente de temperatura, entre las aletas y el fluido de trabajo y que las fuerzas viscosas del fluido se ven afectadas por este fenómeno debido a la presencia de los cambios en magnitud y dirección de los vectores de velocidad del fluido.

Esta investigación trata sobre como el número de aletas, el espesor de estas y la distancia entre ellas afecta la eficiencia térmica y la transferencia de calor global en un arreglo rectangular, mediante los resultados se puede observar cual es el parámetro más significativo que se debe tomar en consideración al momento de diseñar un disipador de energía y de estar forma disminuir la temperatura de operación de los circuitos electrónicos haciendo de esta forma más optimo su funcionamiento.

2. Desarrollo

En este trabajo se analiza la transferencia de calor y la eficiencia térmica de un arreglo cuadrado de aletas de sección transversal rectangular. En la Figura Nº 1 se presenta un esquema del arreglo de superficies extendidas que se analiza.

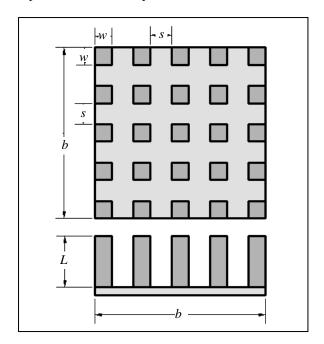


Fig. 1. Esquema del arreglo de superficies extendidas analizado.

Los parámetros que intervienen en el diseño de las aletas son: el ancho del arreglo (w), separación entre las aletas (s), coeficiente de transferencia de calor por convección entre las superficies y el fluido (h), número de aletas (N), longitud de la placa que soporta las aletas (b) y la longitud de aletas (L). Solamente se analiza cómo influyen w, s y N en el funcionamiento del arreglo de aletas. No se analiza cómo influyen b y L, ya que son parámetros geométricos definidos por las dimensiones del sistema mecatrónico donde se coloque el arreglo de las aletas, por lo regular estas no pueden ser modificadas. No se analiza tampoco la influencia de hya que no es un parámetro geométrico, sino que depende de la velocidad y el valor de las propiedades termodinámicas del fluido.

2.1 Nomenclatura

En la Tabla Nº 1 se presenta el significado de las variables y constantes utilizadas en las ecuaciones del modelo matemático desarrollado

Tabla 1. Significado de las variables utilizadas

Significado
Área de la base en contacto directo con
el fluido que rodea las aletas
Área transversal de la aleta
Área superficial total de la aleta
Área total de transferencia de calor
Longitud de la placa base
Coeficiente de transferencia de calor
por convección entre la aleta y el
fluido que la rodea
Conductividad de la aleta
Longitud de la alerta
Variable definida por la Ecuación (2)
Variable definida por la Ecuación (3)
Número de aletas por línea en el
arreglo
Perímetro de la sección transversal de
la aleta
Coeficiente de correlación
Transferencia de calor de la aleta
Transferencia de calor total
Separación entre las aletas
Temperatura superficial de la base
Temperatura del fluido
Ancho de la aleta
Diferencia de temperaturas entre la
superficie y el fluido
Eficiencia de una aleta
Eficiencia global del arreglo
Efectividad de la aleta

2.2 Modelo matemático

El modelo matemático que describe la solución del caso de estudios se presenta a continuación. La transferencia de calor de la aleta (q_f) está dada por la Ecuación (1). La Ecuación (2) define la variable m y M es definida por la Ecuación (3).

$$q_f = M \frac{\operatorname{senh} mL + (h/mk) \operatorname{cosh} mL}{\operatorname{cosh} mL + (h/mk) \operatorname{senh} mL}$$
(1)

$$m^2 = \frac{hP}{kA_a} \tag{2}$$

$$M = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \tag{3}$$

El área transversal de la aleta para secciones transversales cuadradas (A_c) está dada por la Ecuación (4) y la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido que rodea el arreglo de las aletas (θ_b) está dada por la Ecuación (5).

$$A_{a} = w^{2} \tag{4}$$

$$\theta_b = T_b - T_{\infty} \tag{5}$$

La eficiencia de una aleta (η_f) está dado por la Ecuación (6).

$$\eta_f = \frac{q_f}{h A_f \theta_h} \tag{6}$$

El área superficial total de cada una de las aletas para aletas de sección transversal cuadradas (A_f) se determina por la Ecuación (7).

$$A_f = 4Lw + w^2 (7)$$

La eficiencia del arreglo de las aletas (η_0) está dado por la Ecuación (8). El área total de transferencia de calor (A_t) está definida por la Ecuación (9). Para un arreglo cuadrado con aletas rectangulares, el área de la base en contacto directo con el fluido que rodea las aletas (A_b) se determina por la Ecuación (10).

$$\eta_0 = 1 - \frac{N^2 A_f}{A_f} (1 - \eta_f) \tag{8}$$

$$A_{r} = N^2 A_f + A_h \tag{9}$$

$$A_b = b^2 - N^2 A_c (10)$$

La transferencia de calor total del arreglo de aletas (q_t) está dada por la Ecuación (11), mientras que la efectividad de las aletas (ε) está dada por la Ecuación (12). Finalmente la Ecuación (13) define la relación existente entre N, s y w.

$$q_t = \eta_0 h A_t \theta_b \tag{11}$$

$$\varepsilon = \frac{q_f}{hA_c\theta_b} \tag{12}$$

$$s = \frac{b - Nw}{N - 1} \tag{13}$$

Las ecuaciones (1) a (13) representan el modelo matemático del caso de estudio analizado.

1. Análisis de resultados

En la figura Nº 2 se presenta un diagrama de la solución del modelo matemático desarrollado.

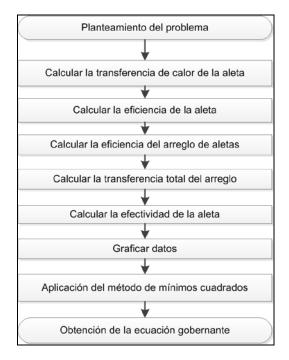


Fig. 2. Diagrama de solución del modelo matemático.

Utilizando el modelo matemático representado por las ecuaciones (1) a (13) se resuelven cinco casos de estudio para conocer la eficiencia térmica y la transferencia de calor del arreglo de aletas así como la efectividad de cada aleta. Para la solución del modelo se utilizan los valores de la Tabla N° 2, considerando que el material de las aletas es aluminio y que el fluido que rodea a las aletas es aire. El valor

de *s* se obtiene para cada caso en particular mediante la Ecuación (12), *w* y *s* se determinan de tal forma que tengan un valor mínimo de 0.001 m. las condiciones específicas de cada análisis son:

- *N* = 5, *w* se varia de 0.001 m hasta 0.0192 m con un intervalo de paso de 0.0001 m, se realizan un total de 183 análisis
- *N* = 10, *w* se varia de 0.001 m hasta 0.0091 m con un intervalo de paso de 0.0001 m, se realizan un total de 82 análisis
- *N* = 15, *w* se varia de 0.001 m hasta 0.0058 m con un intervalo de paso de 0.0001 m, se realizan un total de 49 análisis
- *N* = 20, *w* se varia de 0.001 m hasta 0.0041 m con un intervalo de paso de 0.0001 m, se realizan un total de 32 análisis
- *N* = 25, *w* se varia de 0.001 m hasta 0.0031 m con un intervalo de paso de 0.0001 m, se realizan un total de 22 análisis

Tabla 2. Valores de las variables utilizadas

Símbolo	Valor
b	100 mm
h	$150 \text{ W/m}^2\text{K}$
k	177 W/m•K
L	30 mm
N	Valor especificado en cada análisis
S	Valor especificado en cada análisis
T_b	75 °C
T_{∞}	25 °C
w	Valor especificado en cada análisis

El modelo matemático es programado en el Software EES® (Engineering Equation Solver®) y se resuelve para cada uno de los casos de estudios planteados. Posteriormente los resultados obtenidos son exportados a Excel donde son graficados y se les aplica el método de mínimos cuadrados para obtener las ecuaciones resultantes.

La Figura N° 3 muestra gráficamente la variación de la eficiencia térmica para los cinco casos de estudios mencionados anteriormente. Se observa para todos los casos que conforme aumenta w aumenta η_0 . La Figura N° 4 muestra gráficamente la variación de la transferencia de calor para los cinco casos de estudios mencionados anteriormente. Se observa para todos los casos que conforme aumenta w aumenta q_t . A los resultados de las Figuras N° 3 y N° 4 se les aplica el método de mínimos cuadrados para obtener ecuaciones polinómicas de cuarto orden que representen la variación de η_0 en función de w, Ecuaciones (13), (15), (17), (19) y (21) y ecuaciones lineales que representen la variación de q_t en función de w, Ecuaciones (14), (16), (18), (20) y (22).

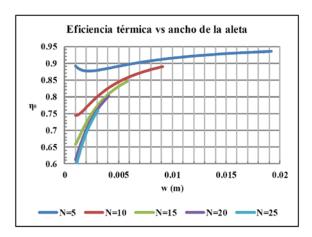


Fig. 3. Gráfica de la variación de la eficiencia térmica en función del ancho de la aleta.

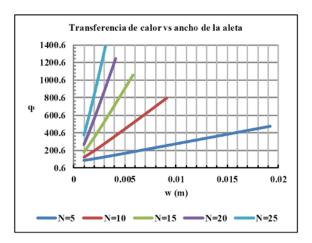


Fig. 4. Gráfica de la variación de la transferencia de calor en función del ancho de la aleta.

La Ecuación (13) tiene un valor de R^2 =0.9912 y la Ecuación (14) tiene un valor de R^2 =0.9999, ambas se aplican para el caso de N=5.

$$\eta_0 = 3x10^6 w^4 - 149752 w^3 + 2073 w^2 - 6.08 w + 0.88$$
 (13)

$$q_{c} = 21490w + 60.444 \tag{14}$$

La Ecuación (15) tiene un valor de R^2 =0.9994 y la Ecuación (16) tiene un valor de R^2 =0.9997, ambas se aplican para el caso de N = 10.

$$\eta_0 = 4x10^7 w^4 - 836614 w^3 + 3250 w^2 + 25.8 w + 0.71$$
 (15)

$$q_{c} = 83940w + 26.681 \tag{16}$$

La Ecuación (17) tiene un valor de $R^2=1$ y la Ecuación (18) tiene un valor de $R^2=0.9995$, ambas se aplican para el caso de N=15.

$$\eta_0 = 9x10^7 w^4 - 558781w^3 - 7285w^2 + 90.5w + 0.57$$
 (17)

$$q_t = 183853w - 18.410 \tag{18}$$

La Ecuación (19) tiene un valor de $R^2=1$ y la Ecuación (20) tiene un valor de $R^2=0.9994$, ambas se aplican para el caso de N=20.

$$\eta_0 = 4x10^7 w^4 + 2x10^6 w^3 - 26646 w^2 + 158.8 w + 0.48$$
 (19)

$$q_t = 317650w - 70.142 \tag{20}$$

La Ecuación (21) tiene un valor de $R^2=1$ y la Ecuación (22) tiene un valor de $R^2=0.9994$, ambas se aplican para el caso de N=25.

$$\eta_0 = -1x10^8 w^4 + 5x10^6 w^3 - 49832w^2 + 219.8w + 0.41$$
 (21)

$$q_t = 482342w - 126.08 \tag{22}$$

La Figura N° 5 muestra gráficamente la variación de la efectividad para los cinco casos de estudios. Se observa que conforme aumenta w disminuye ε . Finalmente a los resultados de la Figura N° 5 se les aplica el método de mínimos cuadrados para obtener una ecuación polinómica de cuarto orden que representa la variación de ε en función de w, Ecuación (23). La Ecuación (23) tiene un valor de R^2 =0.99 y se aplica para las condiciones mostrada.

$$\varepsilon = 3x10^{9} w^{4} - 2x10^{8} w^{3} + 3x10^{6} w^{2} - 21555w + 76.5 \quad (23)$$

$$N = 5 \quad 0.001 \, m \le w \le 0.0192 \, m$$

$$N = 10 \quad 0.001 \, m \le w \le 0.0091 \, m$$

$$N = 15 \quad 0.001 \, m \le w \le 0.0058 \, m$$

$$N = 20 \quad 0.001 \, m \le w \le 0.0041 \, m$$

$$N = 25 \quad 0.001 \, m \le w \le 0.0031 \, m$$

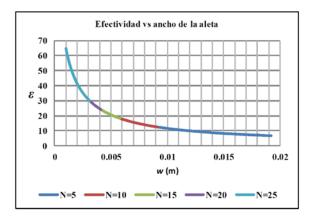


Fig. 5. Gráfica de la variación de la efectividad en función del ancho de la aleta.

2. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que conforme disminuye el número de aletas y aumenta el espesor de estas, mientras se mantienen fijos los demás parámetros, la eficiencia térmica del arreglo también aumenta, esto se debe a que existe un aumento en el área de transferencia de calor. Si se aumenta el número de aletas y el espesor de estas, mientras se dejan fijos los demás parámetros, la transferencia de calor del arreglo también aumenta, esto se debe a que existe un aumento en el área de transferencia de calor. La efectividad de las aletas solamente se ve influenciada por el aumento del espesor de las aletas, va que esto aumenta el área de transferencia de calor. Las ecuaciones obtenidas por el método de mínimos cuadrados se ajustan fuertemente a los valores obtenidos, por lo tanto pueden ser usadas para determinar la eficiencia térmica y la transferencia de calor para las condiciones de funcionamiento especificadas. Es importante realizar un estudio de la variación del coeficiente de transferencia de calor y como esto afecta la eficiencia térmica del arreglo de aletas.

Referencias

- [1] Marín J., "Análisis y medición de flujo de calor generado en un circuito electrónico", Trabajo de investigación para optar al título de Magister en ingeniería, Universidad industrial de Santander, Facultad de ingeniería físicomecánicas, 2005.
- [2] Correa R., Reyes O., y Marín J., "Disipación de la energía generada en un circuito electrónico utilizando un TPTC (heat pipe)", Revista Ingeniería e Investigación, Universidad Nacional de Colombia, Volumen 30, Número 1, pp. 106-1011, 2010.
- [3] Marín J., Tibaduiza D. y Correa R., "Determinación experimental de la cantidad de calor emitida por un circuito electrónico", Revista Ingeniería, Universidad de Medellín, Volumen 11, Número 20, pp. 191-202, 2012.
- [4] Girón B, Hernández A., Rubio C., Hilda R., "Optimización y análisis de arreglos de aletas de perfil rectangular, triangular, parabólico cóncavo, parabólico convexo, anulares (hiperbólico, triangular, rectangular) y alfiler", Revista iberoamericana de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Volumen 10, Número 3, pp. 33-39, 2006.

- [5] Zúñiga J. L., Hernández A., Rubio C. y Solorio F. "Disipación de energía a partir de la variación de parámetros geométricos en dispositivos electrónicos", 4to Congreso internacional, 2do congreso nacional de métodos numéricos en ingeniería y ciencias aplicadas, UMSNH-aSMMNI-CIMNE, Morelia, Michoacán, México 2007.
- [6] Carvajal I., Sánchez F., Cruz J., Núñez E. y Abugaber J., "Comparación de la eficiencia térmica de tubos aletados inclinados y tubos con aletas inclinadas", Revista iberoamericana de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Volumen 8, Número 1, pp. 31-38, 2004.
- [7] Carvajal I., Sánchez F., Cruz J. y Tolentino R., "Influencia del arreglo de tubos sobre las características de una superficie extendida de tubos con aletas cónicas", Revista Científica, Instituto Politécnico Nacional, Volumen 12, Número 3, pp. 107-112, 2008.
- [8] Obregón S., Molina V. y Salvo N., "Simulación de fenómenos de convección natural en recintos cerrados", Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ASADES, Volumen 9, paginas 08.85-0.8.90, 2005.
- [9] Gil L., "Caracterización experimental de una superficie extendida para su aplicación en intercambiadores de calor enfriados por aire", Tesis maestría en ciencias, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [10] Basualdo J., "Investigación experimental para determinar la resistencia térmica por contacto en tubos bimetálicos aletados", Tesis maestría en ciencias, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [11] López M. y Bautista O., "Determinación de la eficiencia de una aleta con conductividad térmica variable, mediante el método de perturbación homotópica", Tesina de especialidad en ingeniería mecánica, Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [12] Argumedo P., "Simulación numérica de la transferencia de calor por convección libre en superficies verticales con aletas inclinadas", Tesis maestría en ciencias, Instituto Politécnico Nacional, 2010.