



OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ARREGLOS DE ALETAS DE PERFIL RECTANGULAR, TRIANGULAR, PARABÓLICO CÓNCAVO, PARABÓLICO CONVEXO, ANULARES (HIPERBÓLICO, TRIANGULAR, RECTANGULAR) Y ALFILER

BENJAMÍN GIRÓN-PALOMARES¹, ABEL HERNÁNDEZ-GUERRERO¹
CUAUHTÉMOC RUBIO ARANA¹, ROSA HILDA CHÁVEZ²

¹Universidad de Guanajuato
Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica
Tampico 912, Col. Bellavista, C.P. 36730, Salamanca, Guanajuato, México

²Gerencia de Ciencias Ambientales
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,
Carretera México km. 36.5– Toluca, Municipio de Ocoyoacac 52045, Salazar Estado de México, México

(Recibido 3 de abril de 2004, revisado 25 de agosto de 2005, para publicación 15 de junio de 2006)

Resumen – En las últimas décadas los parámetros que afectan el funcionamiento de intercambiadores de calor aletados, tales como el espaciamiento entre aletas, perfil de la aleta, geometría del arreglo, material de la aleta, etc., han sido analizados más profundamente. Este trabajo conjunta el estado del arte en las últimas investigaciones analíticas técnicas, experimentales y numéricas de los tipos de aleta y arreglos geométricos más usados (e incluso nuevos perfiles). El análisis permite, para un arreglo dado, hacer una optimización para maximizar la transferencia de calor, además de que se pueden hacer comparaciones del desempeño de distintos arreglos permitiendo obtener el arreglo que tenga menor peso y volumen con una mejor eficiencia.

Palabras clave – Aletas, optimización numérica, intercambiadores de calor, mejora de la transferencia de calor.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de superficies extendidas, comúnmente llamadas aletas, para aumentar la transferencia de calor entre un objeto y sus alrededores es muy frecuente en ingeniería, debido al alto porcentaje de aumento de la transferencia de calor y al poco costo de su producción. Su uso industrialmente hablando es amplio, sobre todo en intercambiadores compactos de calor. Los intercambiadores compactos de calor recientemente han surgido como una excelente opción para las aplicaciones industriales, algunos intercambiadores compactos como los soloaires son ampliamente usados en la actualidad. Múltiples investigaciones se han conducido con relación a este tema: aletas con condensación sobre su superficie [1], aletas con varios tipos de ebullición sobre su superficie [2], evaporación y condensación en tubos microaletados [3], optimización de arreglos de aletas, aletas con un coeficiente de transferencia convectiva de calor variable [4], análisis bidimensional de aletas galvanizadas [5], etc.

En el presente trabajo se desarrolla un código computacional complejo, pero fácil de manejar, que conjunta las múltiples investigaciones con relación a las aletas. El programa proporciona principalmente una guía para el mayor entendimiento de los parámetros que afectan la transferencia de energía en una aleta. Este programa conjunta varias ventajas, puede ser utilizado de una manera didáctica pero también como un software de diseño. Puede ser utilizado de manera didáctica ya que da la posibilidad de realizar variaciones paramétricas, lo cual permite que un estudiante de la transferencia de calor entienda la influencia de los distintos parámetros que afectan el desempeño de una aleta. También puede ser utilizado como un software de diseño, puesto que el programa desarrolla una optimización de un arreglo de aletas que maximiza la transferencia de calor para una adecuada caída de presión. Aunado a lo anterior, el programa proporciona rapidez en los cálculos y erradica los cálculos realizados por el usuario, ya que el usuario

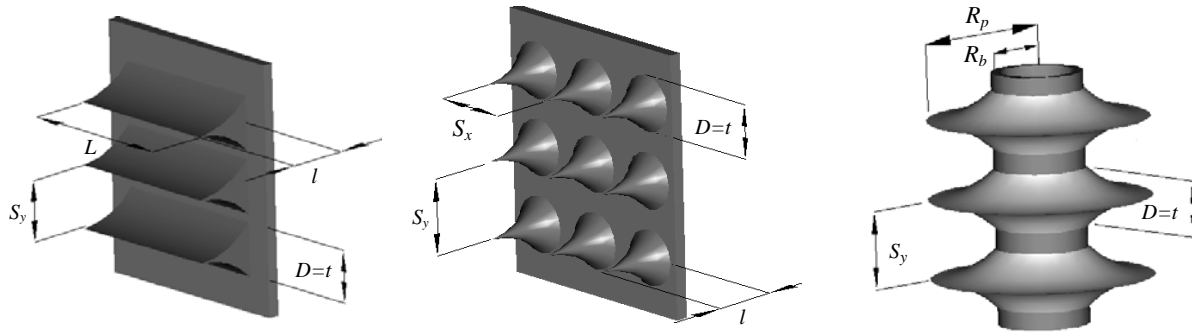


Fig. 1. Arreglos de Aletas (a) Longitudinales, (b) de Alfiler, y (c) Anulares.

sólo debe introducir datos y decidir las condiciones de operación de las aletas. El entorno en el que se maneja el programa es el entorno de windows, por lo que es de un muy buen impacto visual y fácil de manejar. El código producto de este trabajo se puede considerar estado del arte, ya que conjunta todas las investigaciones experimentales, analíticas, y numéricas conocidas hasta la fecha, y va más allá de sólo utilizar las formas más simples de aletas. Normalmente en el plano académico universitario sólo se discuten las metodologías para las formas más sencillas de aletas, sin adentrarse en detalles prácticos tales como el peso final del ensamble, o su comparación con otro ensamble que puede hacer el trabajo, probablemente con mayor eficiencia. Además de ello el código permite realizar rutinas para optimizar ya sea los puntos de operación a que será sujeta la aleta o la caracterización de la misma. El código además implementa los criterios más actualizados (simplemente ver la sección de referencias para constatar lo más actualizado del material) en la toma de decisiones para la parametrización del análisis, como se mostrará más adelante (ver por ejemplo ecuaciones (6), (7) y (8)).

2. PROCEDIMIENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UN ARREGLO DE ALETAS

Los tipos de arreglos de aletas considerados en el código se muestran en la Figura 1. En el estudio de aletas generalmente se hace una aproximación al análisis unidimensional despreciando la variación de temperatura en las otras direcciones, L . C. Thomas [6] estudió el significado y la naturaleza de los efectos del transporte de energía en dos dimensiones para una aleta plana rectangular montada sobre una superficie vertical. L. C. Thomas determinó que para un montaje de aleta bimetálico la diferencia entre la transferencia de calor unidimensional y bidimensional es superior al 40%, mientras que para montajes del mismo material son mucho menores las variaciones. Debido a lo cual recomienda utilizar montajes de aletas sobre superficies del mismo material en donde la variación entre el análisis unidimensional y bidimensional puede ser despreciada.

En cuanto al análisis de aletas anulares, D. C. Look [7] estudió analíticamente una aleta anular rectangular considerando un coeficiente convectivo h_c en la punta de la aleta y un coeficiente convectivo h en las superficies laterales. Look realizó tanto análisis unidimensional como bidimensional, concluyendo que para valores de efectividad de la aleta mayores a 10 la diferencia entre el análisis unidimensional y bidimensional puede ser despreciado.

Para todos los análisis considerados en este programa se requiere invariablemente determinar la eficiencia, la transferencia de calor y el perfil de temperatura de una aleta, los cuales se calculan de acuerdo a la literatura técnica [8]. Las ecuaciones involucradas en general son del siguiente tipo:

$$\theta = F(h, k, \text{función Bessel}) \quad (1)$$

$$\eta = Y(h, k, \text{función Bessel}) \quad (2)$$

$$q = G(h, k, \text{función Bessel}) \quad (3)$$

donde la función de Bessel puede ser de diferentes tipos, dependiendo de la geometría de la aleta, por ejemplo las aletas anulares cóncavas y las de alfiler convexas requieren de las Ecuaciones (1), (2) y (3) para su análisis.

El código funciona de tal manera que el usuario puede proporcionar o no el coeficiente convectivo h . En caso de que este sea proporcionado no se realiza ningún cálculo, mientras que si no se proporciona se le requerirá al usuario la información necesaria para calcularlo. Dicha información puede involucrar parámetros tales como velocidad del fluido, geometría de la superficie, orientación de la superficie y tipos de convección. El cálculo de h se realiza de acuerdo a la literatura técnica [9] y se calcula para la superficie base como si no hubiera aletas. Cabe mencionar que el programa proporciona varios tipos de fluidos convectivos a elegir, ya que para calcular h se requieren las propiedades del fluido. Para calcular la conductividad térmica k se utiliza una base de datos en Access, la cual recopila la conductividad térmica de los materiales sólidos de uso más común. Las funciones de Bessel se determinan numéricamente utilizando su representación integral o en su defecto por medio de su representación en forma de sumatoria, en el caso de funciones de Bessel de orden negativo se utiliza una fórmula de recurrencia.

Por otra parte, la eficiencia global η_0 y la transferencia de calor global q_T de un arreglo de aletas se determinan de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\eta_0 = 1 - \frac{N_f S_T}{A_T} (1 - \eta) \quad (4)$$

donde S_T es el área superficial de la aleta, η es la eficiencia de la aleta (calculada para varios perfiles geométricos en [8]) y N_f es el número de aletas en el arreglo.

La transferencia de calor total del arreglo es:

$$q_T = \eta_0 h A_T \theta_b \quad (5)$$

donde η_0 está dado por la ecuación (4).

En las ecuaciones (4) y (5) se puede notar que a pesar de tener las dimensiones de la aleta se tiene un gran problema, el espaciamiento que se debe dar a las aletas. Este problema se resuelve especificando el espaciamiento óptimo entre aletas para cada tipo de arreglo de acuerdo a investigaciones recientes, las cuales toman en cuenta el espesor de las aletas, la configuración del arreglo de aletas, el tipo de fluido convectivo, el perfil geométrico de la aleta e incluso las caídas de presión en el caso de convección forzada sobre las aletas.

Para aletas longitudinales el espacio óptimo entre aletas que maximiza la transferencia de calor de placas enfriadas por convección forzada en el régimen laminar, de acuerdo a Bejan y Sciubba [10], se calcula como:

$$\frac{D_{op}}{L} \cong 2.73 \left(\frac{\mu \alpha}{\Delta P L^2} \right)^{1/4} \quad \text{ó} \quad S = D_{op} \cong 2.15146 \left(\frac{\alpha L}{U} \right)^{1/2} \quad (6)$$

donde μ , α y ΔP son la viscosidad, difusividad térmica y la caída de presión, respectivamente del fluido. L es la longitud de la aleta en la dirección del flujo, D_{op} es el espaciamiento óptimo entre placas y U es la velocidad libre del flujo de fluido. El espaciamiento óptimo para cualquier tipo de aleta longitudinal en convección forzada (laminar o no laminar) se tomará como el definido por la ecuación (6).

De acuerdo a las investigaciones experimentales de A. Alebrahim y A. Bejan [11] se considera en este programa de software que el espaciamiento entre aletas anulares está dado por la misma ecuación que para aletas longitudinales, es decir el espacio óptimo para un arreglo de aletas anulares en convección forzada (laminar o no laminar) se toma como:

$$S = D_{op} \cong 2.15146 \left(\frac{2\alpha R_p}{U} \right)^{1/2}, \quad R_p \text{ es el radio a la punta de la aleta anular} \quad (7)$$

Para aletas de alfiler se tienen dos tipos de espaciamientos, x en la dirección del flujo e y en la dirección perpendicular al flujo. El espaciamiento óptimo en convección forzada en cualquiera de las dos direccio-

nes será tomado como $2.5D$ de acuerdo al análisis experimental realizado por B. A. Jubran, M. A. Hamdan y R. M. Abdualh [12]:

$$S_x = S_y = D_{op} \cong 2.5D \quad (8)$$

B. A. Jubran, M. A. Hamdan y R. M. Abdualh explicaron que para valores muy pequeños del diámetro D , llega incluso a obstruirse casi por completo el flujo de fluido por lo que para diámetros demasiado pequeños es necesario proporcionar altas potencias de bombeo. De acuerdo a Incropera [9] se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= 0.3N_L \left(\frac{\rho}{2} \left(\frac{S_y}{S_y - D} U \right)^2 \right) \leq 1245 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{para gases}) \\ \Delta P &= 0.3N_L \left(\frac{\rho}{2} \left(\frac{S_y}{S_y - D} U \right)^2 \right) \leq 20685 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{para líquidos}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

donde N_L es el número de aletas en la dirección del flujo y ρ es la densidad del fluido.

En caso que la caída de presión sea mayor que 1245 kN/m^2 para gases y 20685 kN/m^2 para líquidos, de la ecuación (9) se calcula S_y (para una caída de presión 1245 kN/m^2 o 20685 kN/m^2 según sea el caso), dicho espaciamiento será tomado como el nuevo espaciamiento óptimo y se utilizará pertinentemente para todos los cálculos que realice el programa.

Debido a la poca existencia de investigaciones en las cuales se analice el espaciamiento óptimo para cualquier tipo de aleta en convección natural, el espaciamiento óptimo utiliza el criterio dado por [12] como $S_x = S_y = 2.5D$ en el caso de aletas de alfiler, y $S_y = 2.5D$ en el caso de aletas longitudinales y anulares. Algunas otras investigaciones importantes en relación a la optimización de arreglos de aletas se muestran en las referencias [4, 13, 14, 15].

3. TIPOS DE ANÁLISIS DESARROLLADOS POR EL PROGRAMA

A continuación se describen los tipos de análisis que realiza el programa, dicho programa fue realizado en Visual Basic. Los detalles de la programación no se muestran en este trabajo debido a su complejidad. En el programa se consideran dos tipos de análisis.

- Dimensiones conocidas. Se conocen las dimensiones de la aleta y se desea obtener la variación del perfil de temperatura y la cantidad de calor perdido o ganado al variar parámetros que afectan su desarrollo. Los parámetros que se pueden variar son la longitud de la aleta, espesor de la aleta, temperatura de la base de la aleta, temperatura de la punta de la aleta, material de la aleta, fluido convectivo, coeficiente convectivo, temperatura del fluido, radio a la punta de la aleta y tipo de aleta.
- Superficie y flujo de calor conocido. Se conoce la geometría de la superficie de transferencia de calor y el flujo de calor que se necesita para un tipo de aleta determinado, requiriendo conocer las dimensiones de la aleta al variar distintos parámetros. Los parámetros a variar son la temperatura de la base de la aleta, material de la aleta, fluido convectivo, coeficiente convectivo, temperatura del fluido, flujo de calor del arreglo y tipo de aleta.

Entre los tipos de aletas que se pueden analizar mediante este programa están las aletas anulares de perfil triangular, rectangular e hiperbólico, aletas longitudinales de perfil rectangular, triangular, parabólica convexa y parabólica cóncava, y por último aletas de alfiler de perfil cilíndrico, cónico, parabólico convexo y parabólico cóncavo.

Dimensiones Conocidas para Diferentes Tipos de Aletas Radiales

Comparación del Comportamiento de Varias Aletas para este Caso

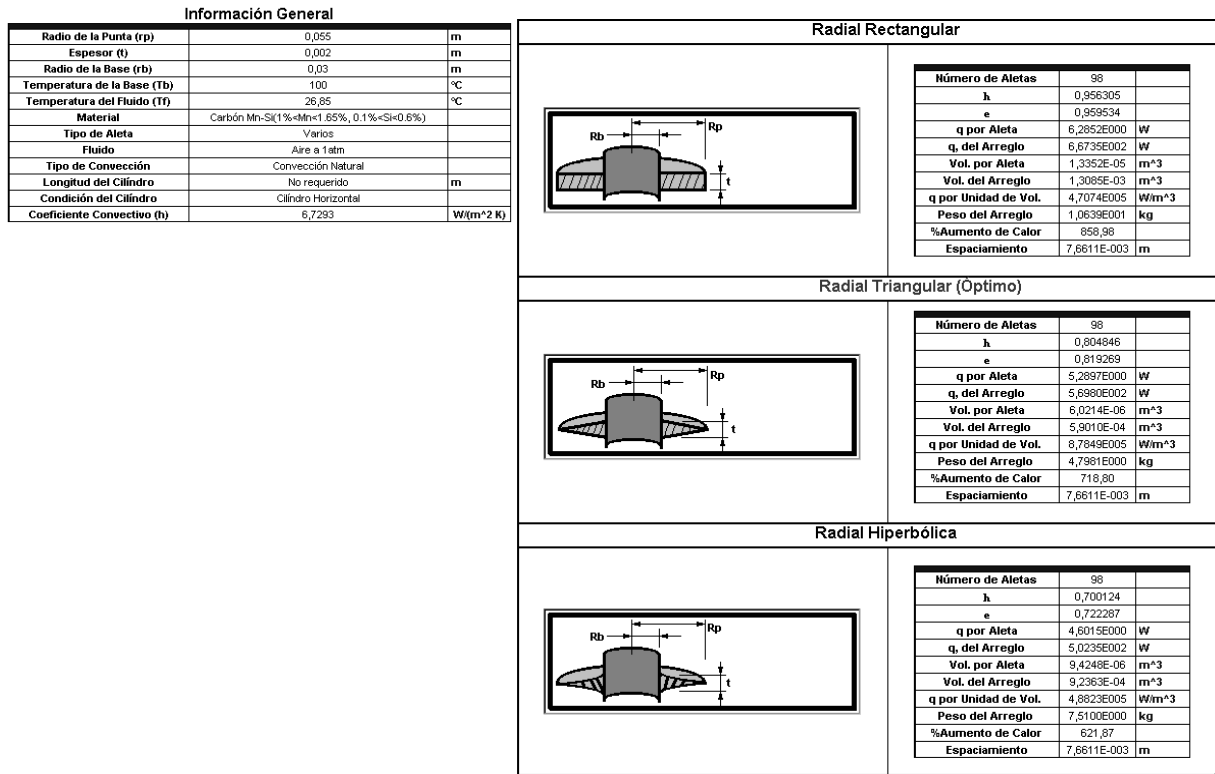


Fig. 2. Resultados para el análisis de dimensiones conocidas de aletas anulares.

En las Fig. 2 y 3 se presentan los resultados y las gráficas obtenidos por el programa para un análisis de dimensiones conocidas variando el tipo de aleta, mientras que en la Fig. 4 se muestran los resultados para un análisis realizado para superficie y flujo de calor conocido. La comparación incluye peso, efectividad, transferencia de calor por unidad de volumen, materiales, fluido convectivo, etc., de tal forma que se logra la optimización de un arreglo de aletas dado, el arreglo más óptimo se elige de acuerdo a la mayor transferencia de calor por unidad de volumen. Estos análisis también se pueden realizar para aletas longitudinales y de alfiler.

Como se puede observar en los resultados, siempre se elige como el arreglo de aletas más óptimo a aquél que tiene la mayor transferencia de calor por unidad de volumen, sin embargo se puede elegir la aleta más óptima en función de cualquiera de las cantidades mostradas en los resultados. Todos los resultados fueron validados analíticamente y se comprobó que el grado de aproximación entre los datos calculados por el programa y los analíticos es muy bueno.

Las aletas analizadas son las más comúnmente usadas debido a la factibilidad de su construcción. Para el cálculo de la eficiencia, la transferencia de calor y el perfil de temperatura se cuenta con las soluciones exactas por lo que el programa no resuelve ecuaciones diferenciales, lo cual lo hace más exacto en los cálculos, con la excepción de la determinación de algunas funciones Bessel que se determinan por integración numérica y la realización de sumatorias con un número determinado de elementos. La determinación del espaciamiento óptimo entre aletas se hizo de acuerdo a investigaciones publicadas en revistas científicas especializadas.

Es claro que este trabajo ayuda a comprender al usuario el desempeño de una aleta o arreglo de aletas al variar el perfil, el material, el fluido, o cualquiera de los parámetros que se consideran pertinentes en el análisis global de aletas, por lo cual puede ser usado de manera didáctica. También puede ser utilizado

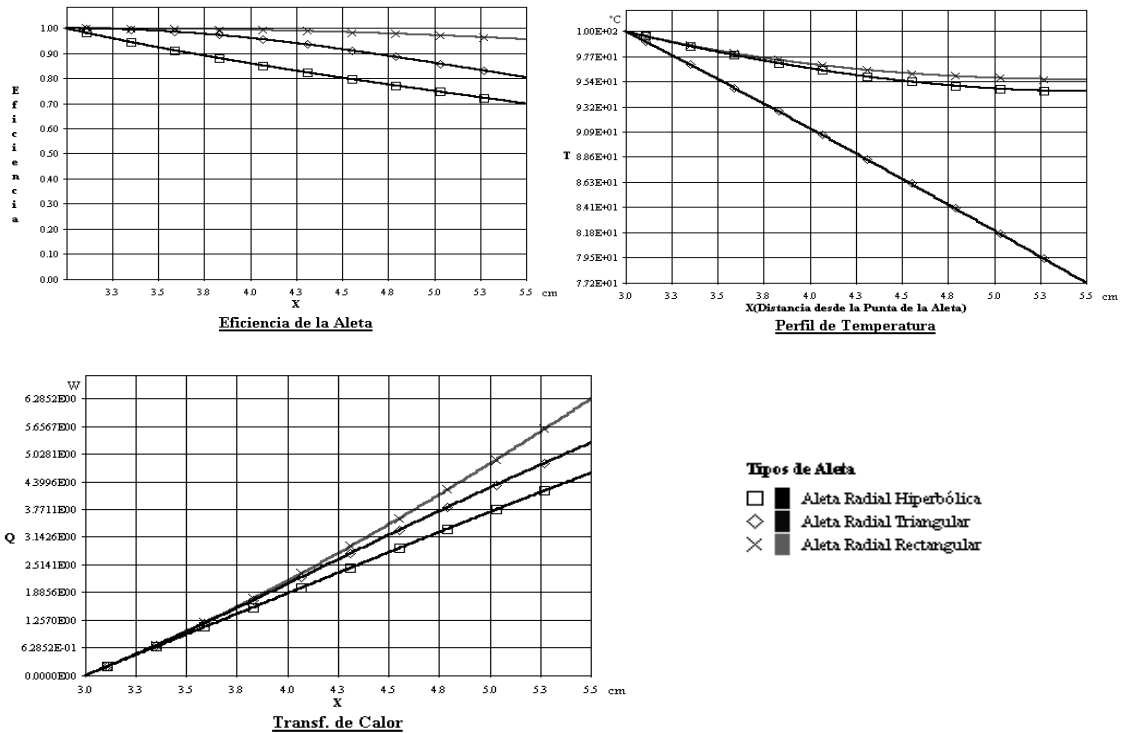


Fig. 3. Gráficas para el análisis con dimensiones conocidas de aletas anulares.

Flujo de Calor Conocido Variando Parámetros de la Aleta Radial Triangular

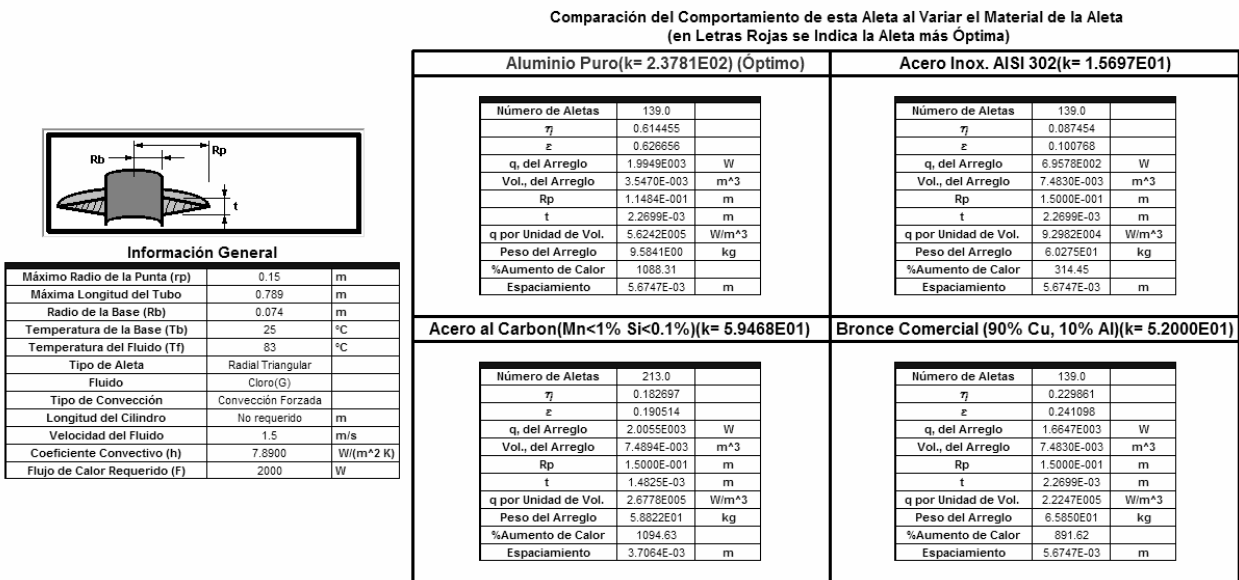


Fig. 4. Resultados para el análisis de flujo de calor conocido (diferentes materiales).

como un programa de diseño, debido a que tiene la capacidad de optimizar un arreglo de aletas maximizando la transferencia de calor para una adecuada caída de presión. El desarrollo de esta optimización se realizó basándose en investigaciones recientes muy serias e importantes en relación a la optimización de arreglos de aletas.

REFERENCIAS

- [1] Han-Taw Chen, Zan Lan, Tzung-I Wang, “Study of Conjugate Conduction-Laminar Film Condensation for a Vertical Plate Fin”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **37**(16), 2592-2597 (1994)
- [2] Liaw, S. P., Yeh, R. H., “Fins with Temperature Dependent Surface Heat Flux II. Multiboiling Heat Transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **37**(10), 1517-1524 (1994)
- [3] Schlager, L. M., Pate, M. B., Bergles, A. E., “Evaporation and Condensation Heat Transfer and Pressure Drop in Horizontal, 12.7-mm Microfin Tubes with Refrigerant 22”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **112**, 1041-1047 (1990)
- [4] Heggs, P. J., Ingham, D. B., Manzoor, M., “The Effects of Nonuniform Heat Transfer from an Annular Fin of Triangular Profile”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **103**, 184-185 (1981)
- [5] Lalot, S., Tournier, C., Jensen, M., “Fin Efficiency of Annular Fins Made of Two Materials”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, 3461-3467 (1999)
- [6] Thomas, L. C., “Heat Transfer in Fin Assemblies Significance of Two-Dimensional Effects-A Reexamination of the Issue”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **121**, 748-752 (1999)
- [7] Look, D. C. Jr., “Fin (on a Pipe) Effectiveness: One Dimensional and Two Dimensional”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **121**, 227-230 (1999)
- [8] Mikhailov, M. D., Özisik, M. N., *Unified Analysis and Solutions of Heat and Mass Diffusion*, Ed. Wiley-Interscience (1984)
- [9] Incropera, Frank P., De Witt, David P., *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4a Edición, Ed. Prentice Hall (1999)
- [10] Bejan, Adrian, Sciubba, Enrico, “The Optimal Spacing of Parallel Plates Cooled by Forced Convection”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **35**, 3259-3264 (1992)
- [11] Alebrahim, A., Bejan, A., “Constructal Trees of Circular Fins for Conductive and Convective Heat Transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, 3585-3597 (1999)
- [12] Jubran, B. A., Hamdan, M. A., Abdualh, R. M., “Enhanced Heat Transfer, Missing Pin, and Optimization for Cylindrical Pin Fin Arrays”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **115**, 576-583 (1993)
- [13] Prasad, B. S. V., “Fin Efficiency and Mechanisms of Heat Exchange Through Fins in Multi-Stream Plate-Fin Heat Exchangers: Formulation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **39**, 419-428 (1996)
- [14] Karagiozis, A., Raithby, G. D., Hollands, K. G. T., “Natural Convection Heat Transfer from Arrays of Isothermal Triangular Fins in Air”, *ASME Journal of Heat Transfer*, **116**, 105-111 (1994)
- [15] Gerencser, D. S., Razani, A., “Optimization of Radiative-Convective Arrays of Pin Fins Including Mutual Irradiation Between fins”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **38**, 899-907 (1995)

OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF FIN ARRAYS WITH RECTANGULAR, TRIANGULAR, CONCAVE PARABOLIC, CONVEX PARABOLIC, ANNULAR (HYPERBOLIC, TRIANGULAR, RECTANGULAR), AND PIN PROFILES

Abstract – In the last decades the parameters that affect the operation of finned-heat exchangers, such as fin spacing, fin profile, geometry of the array, fin material, etc., have been more closely scrutinized. This work puts together the state-of-the-art in the analytical, experimental and numerical knowledge for the fins and fin arrays most widely used in industry (the paper includes even novelty profiles). The analysis allows, for a given array, to optimize the system to maximize the heat transfer, comparing as well the behavior for different arrays yielding the best arrangement for weight, volume and efficiency.

Keywords – Fins, numerical optimization, heat exchangers, heat transfer enhancement.

