

# ENFRIAMIENTO DE ÁLABES DE TURBINAS APLICANDO LA TEORÍA CONSTRUCTAL

Bautista López, Juan Luis (1), Elizalde Blancas, Francisco (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato- Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [juan\_fj50@hotmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato- Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [franciscoeb@ugto.mx]

## Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un diseño constructal para un álabe de una turbina de gas para un enfriamiento óptimo de la misma. Por lo tanto, esto muestra que la máxima resistencia térmica puede ser minimizada optimizando las razones de las longitudes (alto y ancho) tanto de los conductos de refrigeración y los del álabe. La implementación del diseño constructal se llevó a cabo mediante el software comercial Matlab el cual permite analizar simultáneamente diferentes geometrías y encontrar cuál es la que presenta una menor resistencia térmica y así poder saber qué relaciones de dimensiones son las más adecuadas para el enfriamiento óptimo del álabe.

## Abstract

In this paper, the implementation of a constructional design for a blade of a gas turbine for optimal cooling is presented. Therefore, this shows that the maximum thermal resistance can be minimized by optimizing the length ratios (height and width) of both the cooling ducts and those of the blade. The implementation of the constructional design was carried out using the commercial software Matlab which allows analyzing simultaneously different geometries and determining the one that presents the smaller thermal resistance and thus establishing what dimension ratios are the most appropriate for the optimal cooling of the blade.

### Palabras Clave

Diseño constructal; Optimización; Difusión de calor; Resistencia térmica; Enfriamiento

## INTRODUCCIÓN

### Turbinas de Gas

Las turbinas de gas son dispositivos mecánicos que se encargan de transformar la energía térmica liberada durante la combustión de algún hidrocarburo, en energía mecánica. Algunas de sus aplicaciones más comunes se encuentran en centrales termoeléctricas para la producción de energía eléctrica al igual que en las industrias aeronáutica y aeroespacial. Por ello es importante analizar el interior de estos dispositivos, en específico los álabes ya que juegan un papel muy importante en la realización de la tarea de las mismas pero también son una parte muy sensible ya que están expuestos a ciclos térmicos que pueden limitar la vida útil de una turbina de gas [1].

### Teoría Constructal

La Teoría de Constructal se ha aplicado para evaluar el rendimiento del sistema en varias áreas de la ingeniería como lo es en mecánica de sólidos, refrigeración, intercambiadores de calor, etc. La teoría afirma que el rendimiento de los sistemas de flujo finito puede optimizarse minimizando las resistencias. Por lo general, se formula mediante la definición de restricciones geométricas y un método de optimización como búsqueda exhaustiva o algoritmo genético [2].

La optimización del problema de enfriamiento de un álabe de una turbina de gas fue estudiada utilizando la teoría constructal por Bejan y Lorente. Establecieron dos modelos de los álabes con cavidades de enfriamiento de escala única y múltiple para analizar las prestaciones térmicas de los álabes, y esto funciona en gran medida enriqueciendo la teoría de diseño de optimización [3].

Feng et al. [4] presentan un diseño constructal para un álabe de una turbina de gas con escala simple y doble-escala para conductos circulares y Bosc [5] presenta un diseño constructal para una turbina de gas para un álabe multi-escala con conductos elípticos.

En este trabajo, se presenta una metodología para el enfriamiento óptimo de un álabe con multi-escala de conductos rectangulares de una turbina de gas aplicando la teoría constructal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Planteamiento del Problema

El problema consiste en optimizar la configuración de los conductos rectangulares de refrigeración, de forma que minimice la temperatura máxima sobre el metal asegurando se encuentre por debajo del punto de fusión del material.

En la Figura 1 se muestra el dominio que se busca optimizar así como las dimensiones del mismo y las condiciones de frontera que se tomarán en cuenta para la resolución del problema.

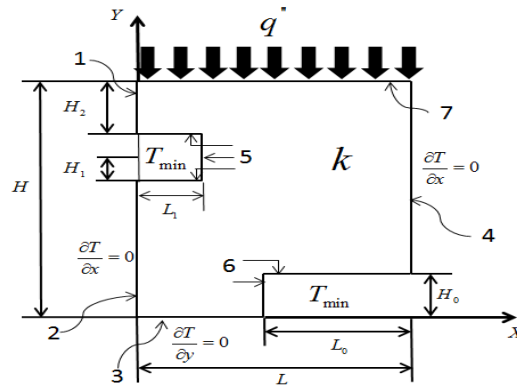


Figura 1: Dominio de estudio con condiciones de frontera.

## Ecuación Gobernante y Condiciones de Frontera

El análisis se realiza en estado estacionario, con propiedades termofísicas constantes. La transferencia de calor en el sólido considerado como un material isotrópico ocurre por difusión térmica. Por lo tanto la ecuación gobernante es:

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

Por otra parte las fronteras marcadas de 1 a 4 en la Figura 1 son adiabáticas, las fronteras marcadas con los números 5 y 6 tienen una temperatura conocida constante y por último la frontera superior 7 tiene una condición de flujo de calor uniforme.

## Metodología

Analizando el problema nos podemos dar cuenta que existen cinco grados de libertad los cuales son:  $H/L$ ,  $H_1/L_1$ ,  $H_0/L_0$ ,  $H_2$ , y  $\phi$ , donde  $\phi$  se define como la razón de las áreas de los ductos de refrigeración entre el área total del dominio. La metodología que se llevó a cabo para la resolución del problema es la siguiente:

- Se mantiene una relación fija  $\phi=0.1$ .
- Primer paso: Se analiza respecto de  $T_{\text{máx}}$  el comportamiento de  $H_2$  con relación a las 4 variables restantes.
- Segundo paso: Se analiza respecto de  $T_{\text{máx}}$  el comportamiento de  $H_0/L_0$ ;  $H_1/L_1$  y  $\phi_0$  ( $\phi_0=0.25H_0L_0$ ), manteniendo constante  $H/L$  y  $H_2$ .
- Tercer paso: Se analiza respecto de  $T_{\text{máx}}$  el comportamiento de  $H/L$  y  $\phi_0$  manteniendo constante el resto de las variables.
- Cuarto paso: Se analiza respecto de  $T_{\text{máx}}$  el comportamiento de la relación material  $\phi$ , mediante la repetición de los pasos 1, 2 y 3 para diferentes valores de  $\phi$  y  $\phi_0$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados a continuación muestran que existe una configuración para un enfriamiento óptimo de un álabe de una turbina de gas. El código desarrollado para resolver la Ec. (1) se validó con los

resultados obtenidos con el software de CFD comercial Fluent. Además se realizó un análisis de independencia de malla cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Independencia de malla para el modelo analizado.

Refinación	Número de Elementos	$T_{\max}$ (K)	Diferencia (%)
1°	750	531.9686	---
2°	1500	533.2366	0.23779313
3°	2500	533.7434	0.09495199
4°	5000	533.9353	0.03594068

Siguiendo con la metodología para el primer paso, en la Figura 2 y Figura 3 se observa que se encuentra un mínimo en  $H_2=10$  para diferentes valores de  $H/L$  y  $H_0/L_0$  respectivamente, al igual que en la Figura 4 se encuentra un mínimo en  $H_2=10$  pero solamente en un rango de  $0.4 < H_1/L_1 < 1.5$ .

Para el segundo paso se obtuvieron dos mínimos los cuales se presentaron en  $H_0/L_0=0.4$  y  $H_0/L_0=2$ , analizando ambos mínimos se obtuvo un comportamiento muy semejante. Por lo tanto, se puede utilizar cualquiera de los valores mencionados anteriormente dentro del análisis (ver Figura 5). En la Figura 6 también se encuentra una relación  $H_1/L_1=0.4$  para el valor mínimo de la máxima temperatura.

Para el tercer paso, se presentan dos casos, para el primero realizamos el análisis manteniendo constante la altura ( $H$ ) del dominio y para el segundo caso se mantiene constante el largo ( $L$ ) del dominio. Los resultados presentados en la Figura 7 muestran que para el primer caso la  $T_{\max}$  disminuye al aumentar la razón  $H/L$ , esto hace sentido ya que con una longitud  $L$  más pequeña se transfiere menos calor al álabo. Para el segundo caso  $T_{\max}$  aumenta conforme  $H/L$  aumenta ya que incrementa la resistencia térmica, por lo que la transferencia de calor no es muy eficiente.

Para el cuarto paso se mantuvieron fijos los valores óptimos obtenidos anteriormente, al momento de realizar el análisis se vio factible realizar dos casos como en el paso anterior, manteniendo fija la altura ( $H$ ) para el primer caso y para el segundo manteniendo el largo ( $L$ ) constante. Los resultados indican que entre más grande sean las relaciones de área  $\phi$  y  $\phi_0$  se tendrá una mejor transferencia de calor como se muestra en la Figura 8.

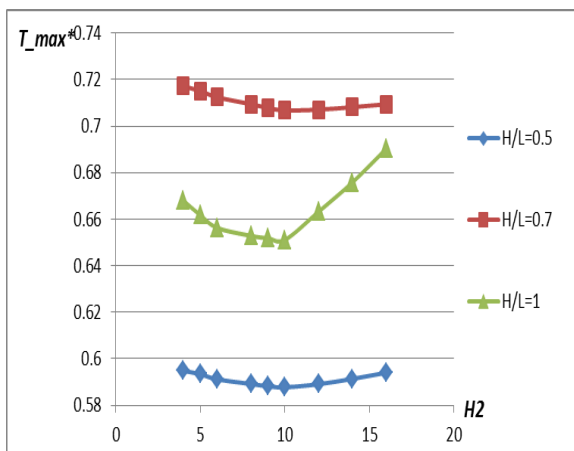


Figura 2:  $T_{\max}$  vs  $H_2$  para diferentes valores de  $H/L$ .

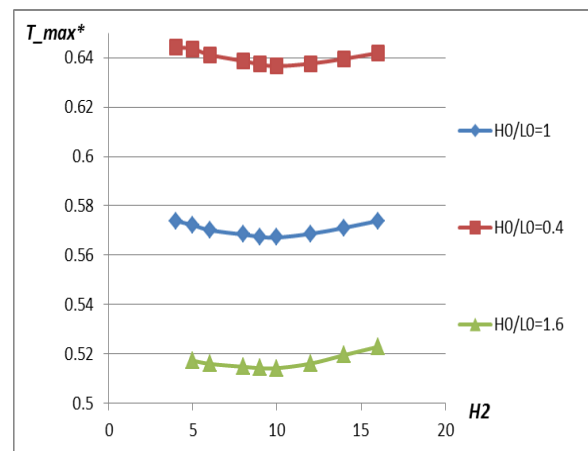


Figura 3:  $T_{\max}$  vs  $H_2$  para diferentes valores de  $H_0/L_0$ .

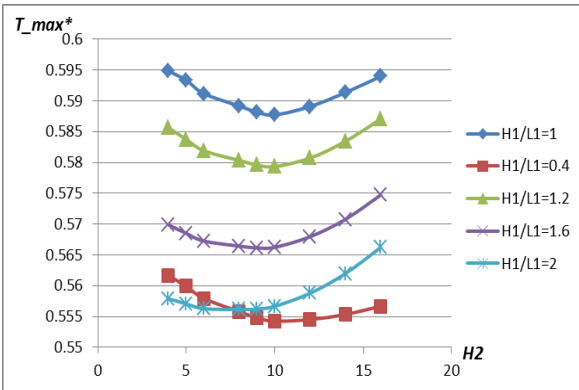


Figura 4:  $T_{m\acute{a}x}$  vs  $H_2$  para diferentes valores de  $H_1/L_1$ .

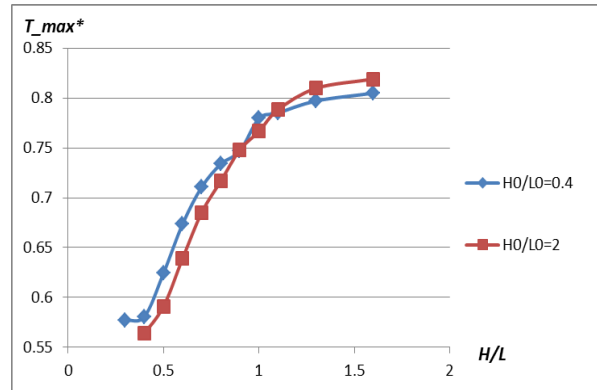


Figura 5:  $T_{m\acute{a}x}$  vs  $H/L$  para diferentes valores de  $H_0/L_0$ .

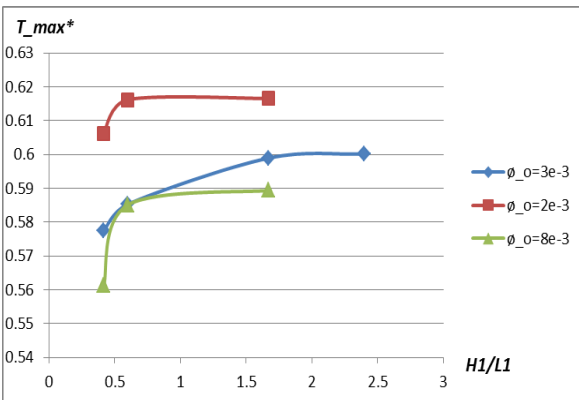


Figura 6:  $T_{m\acute{a}x}$  vs  $H_1/L_1$  para diferentes valores de  $\phi_0$ .

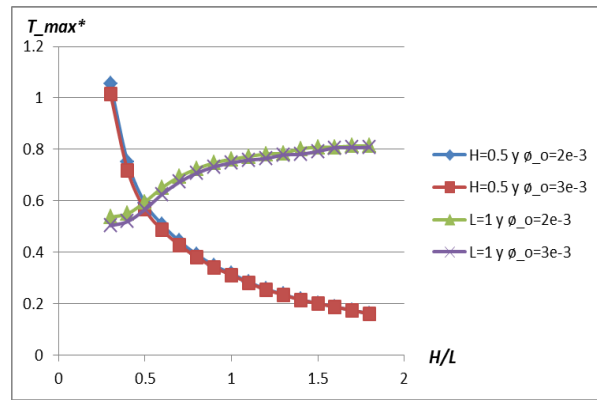


Figura 7:  $T_{m\acute{a}x}$  vs  $H/L$  para diferentes valores de  $\phi_0$  y manteniendo fijo  $H$  o  $L$ .

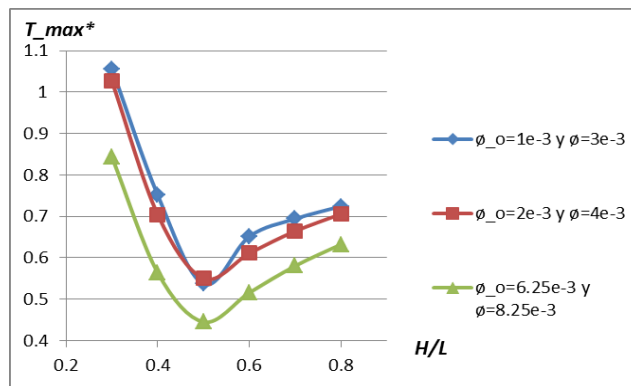


Figura 8:  $T_{m\acute{a}x}$  vs  $H/L$  para diferentes valores de  $\phi_0$  y  $\phi$

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la configuración óptima para el enfriamiento de un álabe de una turbina de gas.

Comparando estos resultados con los de la referencia [5] obtenemos un comportamiento muy similar.

**Tabla 2: Resultados óptimos adimensionales de las relaciones de cavidades.**

Parámetro	Valor óptimo
$[H_2]_{opt}$	10
$[H/L]_{opt}$	0.5
$[H_1/L_1]_{opt}$	0.4
$[H_0/L_0]_{opt}$	0.4
$[\phi_0]_{opt}$	8e-3

## CONCLUSIONES

Existen relaciones óptimas para cada uno de los grados de libertad ( $H_2$ ,  $H/L$ ,  $H_1/L_1$ ,  $H_0/L_0$ ,  $\phi$ ), los cuales minimizan la máxima temperatura del álabe y también la resistencia térmica de la misma.

Al momento de comparar los resultados con otros trabajos reportados en la literatura, se puede decir que los comportamientos son muy similares ya que algunas relaciones de cavidades concuerdan.

Para trabajos futuros se puede proponer un modelo que se acerque más a la realidad, considerando tanto el mecanismo de transferencia de calor por convección y radiación.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, el Dr. Francisco Elizalde Blancas por apoyarme durante la realización de este proyecto y a la Universidad de Guanajuato por darme la oportunidad de participar en el programa verano de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] R.K. Mishra, J. Thomas, K. Srinivasan, V. Nandi, R. R. Bhatt. (2017). Failure Analysis of an Uncooled Turbine Blade in an Aero Gas Turbine Engine. *Engineering Failure Analysis*.
- [2] J. C. Burlamaqui, E. da S. Diaz, L. A. Isoldi, E. Domingues, J. Avila. (2017). A new Constructal Theory based algorithm applied to thermal problems. *International Journal of Thermal Sciences*.
- [3] A. Bejan, & S. Lorente, (2008). *Design with Constructal Theory*, New Jersey, Wiley.
- [4] H. Feng, L. Chen, Z. Xie, F. Sun.(2015). Constructal design for gas-turbine blade based on minimization of maximum thermal resistance. *Applied Thermal Engineering*.
- [5] C. Bosc (2017). *Diseño Constructal de Conductos Elípticos de Refrigeración en Álabes de Turbinas de Gas (Tesis de Maestría)*. Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.