

# LA OPTIMIZACIÓN DE FORMA PARA PERFILES AERODINÁMICOS

Dr. Jesús Mares Carreño, Dra. Griselda Stephany Abarca Jiménez, Ricardo Osorio García, Cecilia Fernanda Cedillo Arellano, Dr. Leonel Germán Corona Ramirez

IPN-UPIIH / IPN-UPIITA

Instituto Politécnico Nacional

*jmaresc@ipn.mx, gabarcaj@ipn.mx, lgcorona@ipn.mx*

Mares, J., Abarca, G., Osorio, R., Cedillo, C. & Corona, L. (1 de noviembre de 2023). La optimización de forma para perfiles aerodinámicos. Boletín UPIITA. 18 (99).

## Resumen

En este documento se describe de manera general la optimización de forma aplicada en perfiles aerodinámicos, para esto se presentan primero generalidades de los perfiles aerodinámicos como geometría y fuerzas durante la operación, posteriormente se plantean las ideas fundamentales de la optimización de forma y finalmente se presentan algunos ejemplos de aplicación en perfiles aerodinámicos. En el proceso de optimización de perfiles aerodinámicos se busca minimizar el coeficiente de arrastre y mejorar la sustentación, esto se alcanza modificando parámetros como el ángulo de ataque, el espesor y combaduras de la sección transversal del perfil.

## 1. Introducción

La interacción entre fluidos y estructuras es un tópico que ha sido estudiado desde hace varias décadas. El estudio de estas interacciones se ha sofisticado y profundizado de la mano del desarrollo de la industria aeroespacial, los automóviles de competencia, desarrollo de proyectiles, generadores hidroeléctricos y eólicos, por citar algunos.

En este sentido la geometría de los elementos estructurales que interactúan con los flujos de fluidos resulta fundamental para obtener el mejor desempeño posible, en consecuencia, la optimización de estas geometrías es de vital importancia para la obtención de productos más eficientes y rentables.

## 2. Perfiles aerodinámicos

Perfil aerodinámico es el nombre asignado a la sección transversal de un elemento estructural que se desplaza a través de un flujo de un fluido. El perfil aerodinámico es determinante en la distribución del campo de presiones alrededor del elemento estructural, dicha distribución de presiones es esencial para, por ejemplo, lograr sustentación en las alas de una aeronave, modificar la resistencia al flujo del fluido o propiciar fuerzas dinámicas en un objeto que se mueva por el flujo.

Definir la forma de un perfil alar para un rendimiento óptimo y un comportamiento adecuado a las necesidades de un sistema es de suma importancia, pues los resultados de arrastre y carga en el perfil pueden variar significativamente al modificar alguno de los parámetros que rigen la geometría de un perfil [1] [2].

Existen perfiles aerodinámicos ampliamente estudiados como lo son los perfiles alares, mejor conocidos como perfiles NACA, los cuales fueron inicialmente propuestos por el comité nacional de aeronáutica de los Estados Unidos de Norteamérica. Aunque existen diversos sistemas de clasificación de la NACA, como serie uno, la serie de cuatro dígitos, la de cinco dígitos, la de seis dígitos o la de siete dígitos [2], sin embargo, los parámetros geométricos básicos son comunes para todos los perfiles (ver Figura 1) [3] [4]:

- I. **Cuerda:** Línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de salida.
- II. **Borde de ataque (B.A):** Primer punto de impacto del aire sobre el perfil.
- III. **Borde de salida (B.S):** Último punto por donde pasa el flujo de aire sobre el perfil.
- IV. **Extradós:** Superficie exterior del perfil.
- V. **Intradós:** Superficie interior del perfil.
- VI. **Radio de curvatura del borde de ataque:** Es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós y cuyo centro coincide con la línea de curvatura media, además es el parámetro principal para definir el borde de ataque.
- VII. **Espesor máximo:** Es una medida que se expresa en un porcentaje de la longitud de la cuerda y representa la máxima separación entre el extradós y el intradós.
- VIII. **Posición del espesor máximo:** Es la distancia desde el borde de ataque sobre el eje horizontal hasta donde se encuentra el espesor máximo.
- IX. **Línea de curvatura media:** Esta línea determina la curvatura del perfil y se encuentra a la misma distancia del extradós y del intradós.
- X. **Ordenada máxima de la línea de curvatura media:** Valor expresado en porcentaje de la distancia máxima entre la cuerda y la línea de curvatura media.
- XI. **Posición de la ordenada máxima:** Es la distancia desde el borde de ataque sobre el eje horizontal hasta donde se encuentra la máxima línea de curvatura, este valor también se expresa en porcentaje.
- XII. **Ángulo de ataque:** Es aquel que se forma entre la línea de la cuerda y la dirección con la que incide el viento relativo sobre el borde de ataque.



Figura 1 Geometría de un perfil alar NACA [3].

Para resolver el problema de optimización del perfil aerodinámico, además de la geometría es necesario conocer las condiciones de operación y las fuerzas que estas condiciones producen sobre el perfil. En un perfil aerodinámico que se desplaza en un flujo de un fluido se presenta la denominada fuerza aerodinámica, cuya componente vertical es denominada fuerza de sustentación y su componente horizontal es conocida como fuerza de arrastre (ver Figura 2). En dirección de actuación opuesta a estas componentes se tiene al peso y el impulso (ver Figura 2).

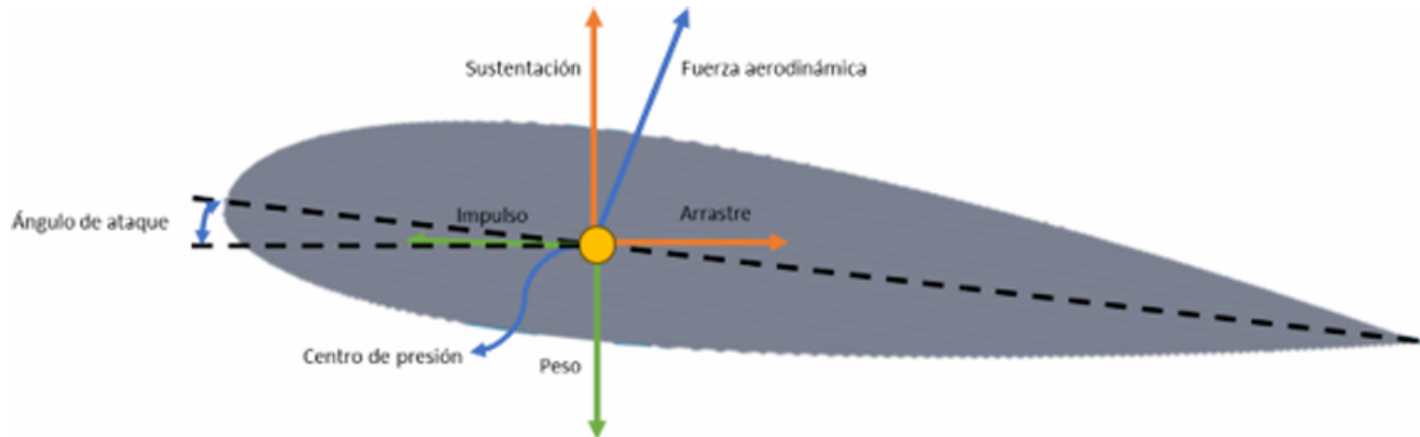


Figura 2 Fuerzas sobre un perfil alar.

La magnitud y dirección de la fuerza aerodinámica dependerán de no solo de los parámetros geométricos del perfil aerodinámico, sino también de las características del fluido y el flujo, además del ángulo relativo entre el flujo y el perfil (ángulo de ataque) (ver Figura 2).

La generación de la sustentación involucra una interacción de acción-reacción entre el fluido y el perfil aerodinámico, en donde este último empuja hacia abajo al fluido y a su vez el fluido empuja hacia arriba al perfil [5]. Por otro lado, un fluido siempre ejerce una presión sobre sí mismo y sobre cualquier superficie que toque, cuando el fluido está en reposo el campo de presiones se mantiene uniforme sobre el perfil y no hay sustentación, pero cuando existe movimiento relativo entre el fluido y el perfil el campo de presiones se modifica generando una diferencia de presiones entre las superficies la cual propicia la sustentación [4]. Así la sustentación se percibe como una diferencia de presiones sobre las superficies del perfil aerodinámico.

Por otro lado, el arrastre siempre es paralelo al flujo del fluido, este se debe principalmente a la fricción entre el fluido y la superficie del perfil, y la presión dinámica que produce la sustentación [4] [5].

Además de lo anterior, siempre será deseable conocer la distribución de presiones sobre el perfil alar para el posterior diseño estructural y la estimación del número Mach crítico, además de que la distribución de presiones sobre el perfil aerodinámico es determinante para el flujo sobre la frontera exterior del perfil por lo cual es recomendable relacionar las características aerodinámicas con las presiones [2].

### 3. La optimización de forma

La optimización de forma se enfoca en trabajar sobre las fronteras del dominio, su propósito es modificar suavemente las fronteras del modelo a fin de alcanzar un perfil geométrico óptimo, manteniendo la topología fija [6]. La optimización de forma es de suma importancia en diversas áreas como el diseño estructural, conformación electromagnética y diseño aerodinámico [7].

El proceso para realizar una optimización de forma se puede sintetizar como se muestra en la Figura 3 [6] [7] [8] [9], en donde se consideran tres etapas generales:

- I. **Diseño.** Es la etapa inicial en la que se define el dominio inicial sobre el que se trabajará, además se definirán las fronteras susceptibles a modificaciones y las fronteras que deben mantenerse sin modificación. En esta etapa las fronteras modificables se suelen modelar con curvas paramétricas, como curvas de Bezier, Splines o B-splines, ya que estas facilitan el manejo de la optimización al poder utilizar las coordenadas de los puntos de control como variables de diseño [9].
- II. **Análisis.** En esta etapa se deben relacionar las condiciones de operación reales con las condiciones de frontera que se usarán computacionalmente, además se determina la técnica y tipos de análisis a realizar para evaluar el desempeño del objeto de análisis. Es común que esta etapa sea llevada a cabo

usando alguna aplicación del Método del Elemento Finito lo cual a su vez condiciona el enfoque de optimización a un "Discretizo-después-optimizo"[8].

III. **Optimización.** En esta etapa se debe formular el problema de optimización, es decir, se definen las variables de diseño, las restricciones y el objetivo de la optimización. Con base en el problema de optimización formulado y las condiciones de frontera previamente definidas se puede elegir el método o algoritmo de optimización que se adecúa mejor al problema. El resultado obtenido después de la implementación del algoritmo de optimización debe ser evaluado en lo que respecta a desempeño y manufacturabilidad.



Figura 3 El proceso de optimización de forma.

Los métodos o algoritmos de optimización de forma pueden clasificarse en dos grandes grupos, los basados en gradientes y los estocásticos. Dentro de los algoritmos basados en gradiente destaca el método de Hadamard para variación de formas [8] [10], en este método las variaciones de forma de la frontera se consideran como pequeñas deformaciones estableciendo así una diferenciación respecto al dominio, este método suele usarse en combinación con técnicas como el método del elemento finito (FEM) o el método del elemento frontera (BEM), como base para otros métodos como el método de optimización de forma de Euler o el método de seguimiento de formas de Lagrange [8].

Por otro lado, en lo que respecta a los métodos heurísticos los que se usan de forma más recurrente son los basados en estrategias evolutivas donde estos se clasifican en métodos de un sólo objetivo y métodos multiobjetivo [9]. En este tipo de métodos se deben encontrar y evaluar un amplio número de soluciones en busca de la óptima, siendo entonces crucial definir formas eficientes de encontrar las soluciones óptimas.

#### 4. La optimización de forma aplicada a perfiles aerodinámicos

Los avances en el cómputo de alto desempeño y algoritmos de solución han permitido un acelerado aumento en la confiabilidad y velocidad de solución de los métodos de la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) lo cual a su vez ha hecho factible la aplicación del CFD en conjunto con métodos de optimización numérica para el diseño de perfiles aerodinámicos, aplicando la optimización de forma [11] [12].

El principal objetivo de la optimización de forma aplicada a perfiles aerodinámicos es producir elementos altamente eficientes a un costo aceptable [13], considerando además la viabilidad de manufactura del componente optimizado. Algunas aplicaciones relevantes de la optimización de forma a perfiles aerodinámicos se presentan a continuación:

- I. En [11] los autores presentan una serie de problemas de optimización basados en el modelo común de investigación de perfil alar, con el fin de establecer una referencia para problemas de este tipo. El modelo presentado considera una geometría 3D, un modelo de turbulencia de Spalart-Allmaras, el método de optimización utilizado es basado en gradiente y se plantea la minimización del coeficiente de arrastre.

II. En [13] se presenta un enfoque industrial para la optimización de forma de perfiles aerodinámicos bajo condiciones de incertidumbre, en donde se aplica un algoritmo basado en gradiente para la optimización, un modelo de turbulencia del tipo k-epsilon y se busca maximizar el cociente entre la sustentación y el coeficiente de arrastre. Se presenta la aplicación en la optimización de un alerón frontal de un monoplaza Formula 1 (ver Figura 4).

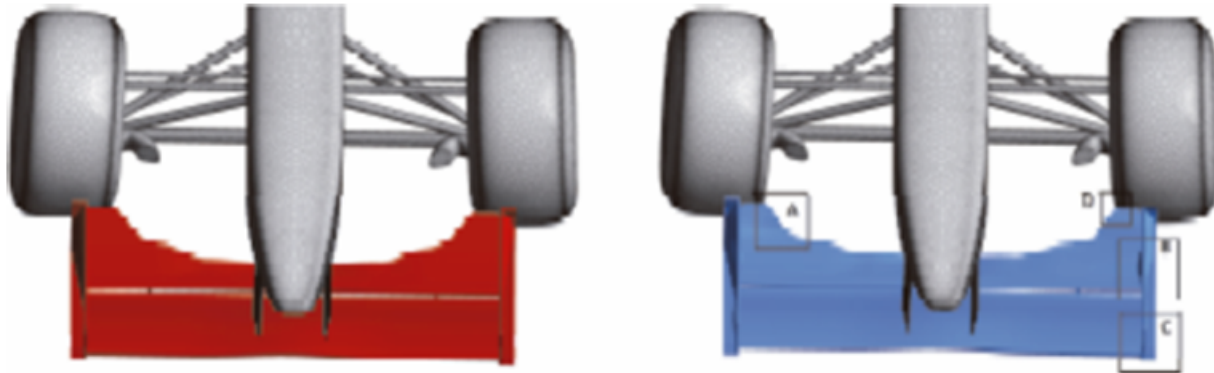


Figura 4 Optimización de un alerón frontal de un monoplaza Formula 1 [13].

III. En [14] se muestra la aplicación de un algoritmo de optimización multiobjetivo aplicando el modelo RBF y la técnica MASSOUD que acopla la optimización aerodinámica y estructural. El método propuesto se aplica en la optimización del aspa de un impulsor la cual se modela con curvas B-spline (ver Figura 5).

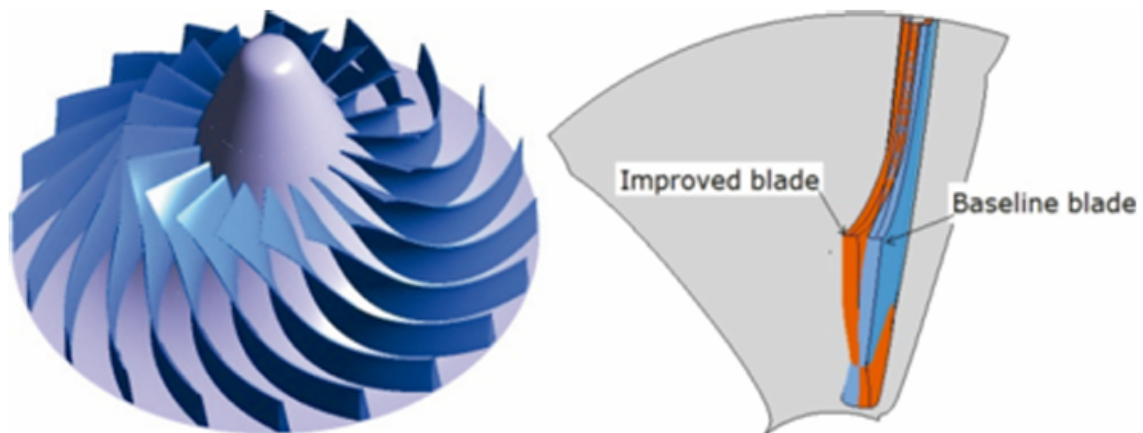


Figura 5 Optimización de forma de un aspa [14].

IV. En [15] se plantean técnicas de optimización de forma para perfiles aerodinámicos, basadas en teoría del control. Se aplica un método de optimización basado en gradiente y se modifica la forma de la frontera del dominio usando una técnica de perturbación de malla.

## 5. Conclusiones

El estudio de perfiles aerodinámicos es de alta importancia en diferentes industrias como la aeroespacial, la automotriz, de transporte o generación de energía, en específico la optimización de los perfiles que permite mejorar el desempeño bajo condiciones de operación específicas.

El problema de la interacción entre fluido y estructura es complejo para su solución analítica, motivo por el cual, métodos computacionales como el CFD han ganado popularidad ya que proporcionan resultados precisos ha un costo admisible. El uso de estos métodos computacionales como base para la optimización está ampliamente extendido.

Gran variedad de técnicas y métodos se han desarrollado para la optimización de forma de perfiles aerodinámicos, sin embargo, sigue siendo un campo basto para ser explorado y proponer nuevas técnicas y métodos que resulten ser cada vez más eficientes desde la perspectiva del desempeño del elemento optimizado, pero también desde la perspectiva computacional consumiendo menos tiempo y recursos para el cálculo.

## Referencias

1. R. Eppler, (1990). *Airfoil Design and Data* Berlin: Springer-Verlag, 1990.
2. I. Abbot y A. Von Doenhoff, (1959). *Theory of wing sections*, Nueva York: Dover Publications, 1959.
3. A. Carmona, (2000). *Aerodinámica y actuaciones del avión*, Madrid: Paraninfo, 2000.
4. G. McBain, (2012). *Theory of Lift*, Wiley, 2012.
5. D. McLean, (2013). *Understanding Aerodynamics*, Londres: Wiley, 2013.
6. B. Upadhyay, S. Sonigra y S. Daxini, (2021). Numerical analysis perspective in structural shape optimization: A review, *Advances in EGINEERING Software*.
7. H. Harbrecht, (2008). Analytical and numerical methods in shape optimization, *Mathematical methods in the applied sciences*, pp. 2095-2114, 2008.
8. G. Allaire, C. Dapogny y F. Jouve, (2021). *Handbook of numerical analysis-Shape and topology optimization*, vol. 22, A. Bonito y R. Nochetto, Edits., Elsevier, 2021.
9. C. Mitropoulou, Y. Fourkiotis, N. Lagaros y M. Karlaftis, (2013). Evolution Strategies-Based Metaheuristics in Structural Design Optimization, de *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*, Elsevier, 2013, pp. 79-102.
10. M. Delfour, (2019). *Introduction to Optimization and Hadamard Semidifferential Calculus*, SIAM, 2019.
11. Z. Lyu, G. Kenway y J. Martins, (2015). Aerodynamic shape optimization investigations of the common reserach model wing benchmark, *AIAA Journal*, pp. 968-985, 2015.
12. A. Concilio, I. Dimino, L. Lecce y R. Pecora, (2018). *Morphing Wing Technologies*, Elsevier, 2018.
13. A. Wade, M. Keating y G. Petrone, (2014). Shape optimisation for aerodynamic performance using adjoint methods, de *The International Vehicle Aerodynamics Conference*.
14. S. Khalfallah y A. Ghenaiet (2013). Shape optimization of a centrifugal compressor impeller, de *8th International Conference on Compressors and their Systems*.
15. A. Jameson y L. Martinelli, (2007). Aerodynamic shape optimization techniques based on control theory de *Computational Mathematics Driven by Industrial Problems*, Berlín, Springer, 2007, pp. 151-221.