

Modelo general para la optimización automática del diseño de componentes aerodinámicos. Caso de estudio: túnel de viento



General model for automatic design optimisation of aerodynamic components. Wind tunnel case study



Isaac Prada-Nogueira¹, Fernando De Cuadra² y Alvaro Sánchez-Miralles²

¹ ICAI, KeelWit Technology S.L., Avda. Presidente Carmona, 2 – 28020 Madrid. Tfno: +34 917 105 836.

² Universidad Pontificia-Comillas. ICAI. Instituto de Investigación Tecnológica. C. Alberto Aguilera, 23 – 28015 Madrid. Tfno: +34 91 542 28 00.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8144> | Recibido: 11/10/2016 • Evaluado: 11/10/2016 • Aceptado: 13/10/2016

ABSTRACT

- Trial and error is still the current approach for the design of many complex aerodynamic components, although extensive research is being carried out in automated optimisation methods. Thereafter these designs are computer simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD). Some optimisation tools are used, at most, for the final fine-tuning. This paper proposes the use of a robust, efficient and automated optimisation methodology throughout the whole design process. The use of these methodologies can yield improved yet not conventional designs, while reducing the design cycle time. This paper presents the development of an original, general methodology based on a multi-attribute, structured optimisation, following a so-called Hybrid Direct Search (HDS), which combines genetic, gradient and swarm search intelligence. An example case study of a wind tunnel shape optimisation is presented. The main contributions of this paper are the exploitation of the concepts of variable hierarchy and variable value change (i.e. optimisation phases) and the HDS optimisation method, which allows for an intelligent and efficient direct search in complex aerodynamic problems in which the use of surrogate based optimisation is not accurate enough. This optimisation methodology is applicable to advanced aerodynamic design in cars, aircraft, high-speed trains, etc.
- **Keywords:** aerodynamic optimisation, wind tunnel design, optimisation methodology, multi-attribute, structured optimisation, hybrid direct search, swarm search, variable hierarchy, geometry parameterisation, computational fluid dynamics.

RESUMEN

El diseño mediante prueba y error es todavía el método utilizado para el diseño de un gran número de componentes aerodinámicos complejos, si bien es cierto que cada vez hay un mayor número de trabajos de investigación sobre métodos de optimización automática. Posteriormente los diseños se refinan con simulaciones por ordenador utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, en sus siglas en inglés). Como mucho se emplean algunas herramientas de optimización para el ajuste fino final de los diseños. Este artículo propone el uso de una metodología de optimización robusta, eficiente y automática durante todo el proceso de diseño. El uso de estas metodologías puede permitir reducir el tiempo requerido para el diseño, así como descubrir diseños sustancialmente

mejores que los actuales. En algunos casos, estos diseños pueden, además, ser poco convencionales y no intuitivos. Este artículo presenta el desarrollo de una metodología general y original basada en una optimización verdaderamente multi-atributo y estructurada, que se ha denominado Búsqueda Directa Híbrida (HDS, en sus siglas en inglés) y que combina técnicas de búsqueda de tipo gradiente, genético y de enjambre. Se presenta un caso de estudio de ejemplo de optimización del diseño geométrico de un túnel de viento. Las principales contribuciones de este artículo son el uso de los conceptos de jerarquía de variables y fases de optimización, en las que los cambios introducidos en los valores de las variables cambian en función de la fase, y, por otro lado, la propuesta de un método de optimización novedoso, el HDS, que permite una búsqueda directa inteligente y eficiente en problemas aerodinámicos complejos en los que el uso de optimización basada en modelos aproximados puede no ofrecer suficiente precisión. Este método de optimización presentado es aplicable al diseño aerodinámico avanzado de vehículos, aviones, trenes de alta velocidad, etc.

Palabras clave: optimización aerodinámica, diseño de túneles de viento, metodología de optimización, optimización estructurada, optimización multi-objetivo, búsqueda directa híbrida, búsqueda de enjambre, jerarquía de variables, parametrización geométrica, dinámica de fluidos computacional.

1. INTRODUCCIÓN

Desde un cohete espacial hasta un tren de alta velocidad, un automóvil o un barco de cualquier tipo, la optimización del diseño aerodinámico puede aportar ventajas importantes como velocidades más altas y menor consumo de combustible. La metodología de optimización presentada en este trabajo es aplicable a todos estos y otros componentes aerodinámicos. Sin embargo, por razones de claridad, nuestro trabajo utilizará como ejemplo la optimización del diseño de túneles de viento cerrados.

El diseño de estas instalaciones de prueba se ha llevado a cabo utilizando tradicionalmente el know-how del diseñador y no haciendo pleno uso de metodologías de optimización robustas, eficientes y automatizadas.

Una metodología general por ordenador permitirá probar muchos más diseños, que pueden no ser lo suficientemente intuitivos para que el diseñador los simule, o que pueden no haber sido analizados por falta de tiempo.

En el trabajo presentado en [1], se describe el problema general del diseño del túnel de viento y se destaca la importancia de

una metodología automática (por ordenador). Este artículo presenta un conjunto completo de atributos y variables verdaderamente independientes, capaces de representar la mayoría de las configuraciones cerradas de túneles, y que permiten la aplicación de métodos avanzados de optimización por ordenador.

Además, debe destacarse que el modelo desarrollado aquí es capaz de: i) optimizar todo el sistema aerodinámico (túnel de viento) y no sólo componentes únicos del sistema (tobera, difusores, esquinas, etc.), que es el foco de gran parte del actual estado de la técnica; ii) estudiar todos los tipos de esquinas (no sólo 90°); iii) considerar secciones transversales de los conductos con geometría rectangular y no rectangular; iv) comparar sistemas de ventiladores usando un número menor de ventiladores de mayor diámetro o un mayor número de pequeños ventiladores; v) ofrecer la posibilidad de considerar diferentes materiales para las paredes del túnel; y vi) permitir diseños de túneles modulares.

La sección 1 presenta una revisión exhaustiva del estado actual de la técnica de las metodologías de diseño aerodinámico y, más ampliamente, de técnicas generales de optimización de múltiples atributos. La sección 2 destaca las contribuciones específicas de este documento. La sección 3 describe el problema matemático subyacente. La Sección 4 desarrolla y discute la metodología general propuesta para el diseño automático y flexible de componentes aerodinámicos. La sección 5 ofrece una visión de la inteligencia metaheurística seleccionada para el algoritmo de optimización. Finalmente, la Sección 6 presenta las principales conclusiones y líneas de investigación futuras.

1. ESTADO DE LA TÉCNICA

En cuanto al diseño de túneles de viento, la mayoría de los trabajos se ocupan sólo de la optimización de secciones concretas del túnel de viento. Éstas son normalmente la tobera o los codos (con sus correspondientes canalizadores), como en [2-9].

Sobre el tema de la optimización del diseño de codos y canalizadores, es importante destacar el trabajo realizado por [10-16]. Algunos trabajos bastante interesantes en cuanto a la optimización de toda la geometría del túnel de viento son [17-19]. Nuestra investigación tiene como objetivo tener en cuenta también otras configuraciones de túnel de viento (no sólo codos a 90°, conductos rectangulares y diseños de múltiples ventiladores). Por lo tanto, esta nueva metodología de optimización es más flexible que los túneles discutidos en la mayoría de los trabajos anteriores y especialmente en [19].

El enfoque más reciente en la optimización aerodinámica avanzada puede verse en [20-24]. El enfoque encontrado en estos trabajos consiste en la parametrización de la geometría, el uso de modelos sustitutivos para aproximar la función objetivo real y finalmente la optimización multi-objetivo utilizando métodos basados en la búsqueda aleatoria (Algoritmos Genéticos y *Simulated Annealing*, SA) o métodos basados en gradiente (Método del Adjunto y *Sequential Quadratic Programming*, SQP).

Los nuevos enfoques relativos a modelos aproximados (o de orden reducido) se dan, por ejemplo, en [25]. Emplean bases locales de orden reducido (ROB, en inglés) y no global, consiguiendo reducciones de tiempo y mejorando la precisión.

Interesantes contribuciones de relevancia para el trabajo presentado en las siguientes secciones también incluyen: [26], por su parametrización de geometrías complejas (del orden de 250 variables), el uso de una arquitectura de evaluador y optimizador y la comparación del método de panel y CFD como evaluadores de soluciones; [27], por el uso de una estrategia de desacoplamiento, para obtener un modelo de optimización de capa única equiva-

lente, a partir de su problema de optimización anidado original; y finalmente ²⁸, por un método para obtener alternativas de diseño desde un diseño preexistente o base y por el uso de metamodelos para pasar de una estructura de optimización anidada a una optimización de bucle único.

También hay trabajos de investigación relevantes en el área de optimización que utilizan diferentes fases, combinadas en la mayoría de los casos con el uso de modelos de diferente grado de detalle (modelos de alta fidelidad y baja fidelidad). Algunos buenos ejemplos, aplicados a la optimización de la forma de perfiles aerodinámicos, son [29] y [30]. Este último explica, por ejemplo, diferentes técnicas de mapeo para encontrar el mejor conjunto de variables de alta fidelidad correspondientes a un conjunto de variables de baja fidelidad y viceversa. Propone una metodología de optimización que combina modelos de baja fidelidad y alta fidelidad y obtiene reducciones en el número de evaluaciones del modelo de alta fidelidad de hasta un 40% utilizando *Proper Orthogonal Decomposition* (POD).

[31], por su lado, utiliza modelos simplificados del modelo real a los que denomina modelos abstractos. También utiliza una evaluación parcial (el uso de propiedades de diseño para afinar el simulador, es decir, mejora sus herramientas de optimización mediante el conocimiento de cómo funciona el diseño, de manera similar a lo que proponemos). También realiza la optimización en diferentes niveles y con diversos algoritmos.

Un área en la que la optimización estructurada en fases es ampliamente utilizada es la de los sistemas VLSI (*Very Large Scale Integration*). [32] describe los diferentes niveles de optimización mientras que [33] indica que los métodos tradicionales de optimización jerárquica (divididos en subproblemas de optimización), que reducen la región de búsqueda, no son la mejor opción. Proponen una metodología plana, en la que limitan lo menos posible la región de búsqueda.

Por último, en lo que respecta a la optimización secuencial, no estrictamente multifase, [34] utiliza una estrategia de desacoplamiento para transformar un problema de optimización de doble bucle en una optimización de un solo bucle, pero no desacopla el problema de optimización en sí, sino que únicamente separa el análisis probabilístico del de optimización.

2. CONTRIBUCIONES

En primer lugar, este trabajo contribuye proponiendo el método CHDS para una optimización multi-atributo en aerodinámica, combinando inteligencia genética, de gradiente y de búsqueda de enjambre en cada iteración. Se trata de una mejora con respecto a muchos trabajos sobre optimización aerodinámica de componentes complejos (alas, morros de tren de alta velocidad, diseños de automóviles, etc.) que utilizan optimización basada en métodos aproximados (*surrogate models*, en inglés), en cuanto a mayor precisión, flexibilidad y aplicabilidad a grandes cambios de la geometría. Es difícil en muchos casos para cualquier modelo aproximado (sea por medio de interpolación de datos y superficies de respuesta, o por modelos de orden reducido o modelos jerárquicos o de multifidelidad, como se explica en [30]) ser una aproximación suficientemente precisa si la función objetivo es fuertemente no lineal, no derivable, o si representa fenómenos como el desprendimiento de flujo y combina variables de muchos tipos diferentes (discreto, continuo, etc.), como es el caso cuando se permiten grandes variaciones de la geometría en problemas de optimización aerodinámica y cuando un cuerpo entero (túnel de viento, en este caso) se optimiza, y no sólo ciertas partes de la geometría.

Por lo tanto, es de gran valor un método basado en un enfoque CHDS, que realiza una selección inteligente de las soluciones candidatas a evaluar, para minimizar el tiempo de cálculo, y se mueve con inteligencia para cubrir eficientemente la región de búsqueda, y con la flexibilidad añadida para el usuario de poder seleccionar la precisión o las limitaciones de tiempo de cálculo.

Una segunda contribución de este trabajo es el análisis de dos aspectos muy relevantes de la metodología de optimización propuesta: la jerarquía de las variables y el cambio del valor de cada variable (bruto o fino) en cada una de las llamadas fases de la optimización. A pesar de que otros trabajos usan el concepto de jerarquía de las variables, el concepto se refiere en esos casos a variables que ofrecen una representación de alto detalle o bajo detalle de la geometría de interés. En este trabajo, el concepto de jerarquía se refiere al hecho de que hay variables con impacto más fuerte o más débil en la función objetivo. A partir de las diferentes jerarquías de variables, el modelo avanza con la optimización en diferentes fases, introduciendo cambios gruesos o finos en las variables, dependiendo de su jerarquía y de la fase. Esta arquitectura no se ha aplicado, hasta donde sabemos, al diseño aerodinámico.

Este documento pretende allanar el camino para la aplicación completa de una metodología de optimización altamente robusta, configurable, flexible y eficiente para producir diseños mejores y potencialmente no convencionales en un tiempo razonable, en muchas aplicaciones aerodinámicas. El modelo establecido debe ser configurado por un diseñador experto, pero posteriormente la herramienta puede ser utilizada por una persona no experta.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La metodología de este artículo se basa en una optimización estructurada de múltiples atributos y que emplea búsqueda directa. La optimización estructurada también se conoce como optimización secuencial, optimización multinivel, optimización anidada u optimización jerárquica.

La arquitectura de optimización utilizada en este documento está especialmente indicada para problemas con las siguientes características, como se explica por ejemplo en [35] y [1]:

1. El número de variables independientes (grados de libertad) es alto.
2. El vector de variables independientes no tiene una dimensión fija. Depende del valor de ciertas variables.
3. Las variables independientes son de tipos matemáticos diferentes (discretas / continuas) y tienen una influencia más fuerte o más débil en el diseño final (jerarquía de variables).
4. El número de restricciones de diseño es alto.
5. Hay atributos de interés para el ingeniero que no pueden ser reducidos eficientemente a una función objetivo única porque son mutuamente conflictivos o no son comparables. Por lo tanto, el problema es verdaderamente multi-atributo.
6. Se deben utilizar métodos de evaluación complejos como los programas de simulación CFD, por lo que el proceso de evaluación (funciones de vinculación) es complejo y lento.

4. METODOLOGÍA

Los dos conceptos principales de esta metodología de optimización son la jerarquía de las variables y las fases de optimización. Este enfoque, incluida la búsqueda directa en la mayoría de los casos, se ha utilizado en otros campos [35] pero aún no en aerodinámica, o al menos no tan a fondo.

En cuanto al diseño del túnel de viento, ya se definió el si-

guiente conjunto eficiente de variables verdaderamente independientes en [1] (ver figuras, a continuación):

1. Anchura del túnel.
2. Longitud de la sección de ensayos.
3. Anchura de la sección de ensayos.
4. Posición relativa del ventilador y la sección de ensayos.
5. Diámetro del ventilador.
6. Geometría de la sección de ensayos.
7. Geometría del perfil del conducto que une la sección de ensayo al ventilador (conducto 1) y del conducto que une el ventilador a la sección de ensayo (conducto 2).
8. Distribución del área para las secciones del túnel de viento.
9. Forma transversal para las secciones del túnel de viento.
10. Número de ventiladores.
11. Otras variables: longitud de difusor, tobera y ventilador, ángulos de difusor y tobera, longitud de ajuste en codos.

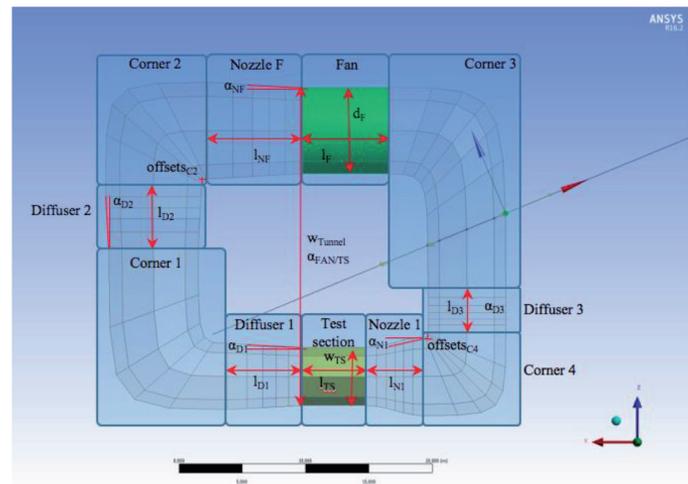


Fig. 1: Conjunto propuesto de variables independientes para el caso de un túnel de viento cerrado 3D, como ejemplo de cómo deben definirse variables para otros componentes aerodinámicos

4.1. PARAMETRIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA

El túnel está discretizado en una serie de secciones transversales. Para este trabajo, cada sección está parametrizada con ocho segmentos de igual longitud, pero esto puede generalizarse a cualquier número y longitud. Cada sección transversal puede tener cualquier geometría. También se puede optimizar el área de cada una de estas secciones, basándose en los datos iniciales introducidos por el diseñador al configurar el problema.

A continuación, las secciones se generan a lo largo de los puntos de un conjunto de curvas de Bézier. Estas curvas son elegidas porque son robustas, evitan formas absurdas y tienen un buen comportamiento matemático y un rendimiento aerodinámico óptimo. Las curvas de Bézier se utilizan ampliamente en la optimización aerodinámica, ver [24]. Un modelo altamente detallado, capaz de representar la mayoría de las geometrías de túnel de viento, requiere 18-20 curvas de Bézier.

4.2. JERARQUÍA DE LAS VARIABLES

Se propone la siguiente jerarquía de variables para el modelo de optimización:

1. **Alta importancia:** anchura del túnel, longitud de la sección de ensayo, anchura de la sección de ensayo, posición relativa del ventilador y la sección de ensayo, diámetro del ventilador y geometría de la sección de ensayo
2. **Importancia media:** perfiles de los conductos 1 y 2 (es decir, los parámetros de la curva de Bézier para los conductos 1 y

- 2), distribución del área y *geometría de las secciones en los conductos 1 y 2*, ángulos de las secciones del difusor y de la tobera, longitudes de ajuste en codos.
3. **Baja importancia:** número de ventiladores.

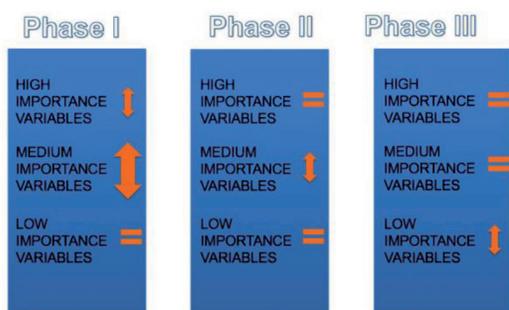


Fig. 2: Estructura del modelo de optimización. El número de fases depende del problema particular y de las limitaciones de precisión y tiempo. Las flechas y signos de igualdad indican magnitud de cambio para cada tipo de variable en cada fase

Debe tenerse en cuenta que la jerarquía de las variables para cualquier caso no es única y debe adaptarse al propósito y la experiencia del diseñador. En aras de la claridad, sólo aquellas variables destacadas en cursiva se consideran verdaderamente variables para este trabajo, mientras que el resto se deja como parámetros.

4.3. FASES DE LA OPTIMIZACIÓN

El segundo aspecto clave de la arquitectura de optimización presentada, además de la jerarquía de variables, es el concepto de fase de optimización (Figura 2).

La diferencia entre fases es el nivel de cambio de las diversas jerarquías de variables. Una flecha grande en la Figura 2 representa cambios gruesos, una pequeña flecha representa ajuste fino y un signo igual significa que las variables de esa jerarquía se mantienen constantes o se calculan a partir de otras. El número de fases de optimización puede ser establecido por el diseñador o determinado por el algoritmo.

Un ejemplo sencillo de la estructura de la Figura 2 puede ser la selección de un vehículo. Una variable de alta importancia sería el tipo de vehículo, y los cambios bruscos serían seleccionar un coche o un camión, mientras que los cambios finos serían la selección entre diferentes tipos de automóviles. Una variable de importancia media sería el combustible del vehículo, siendo los cambios gruesos elegir diésel o gasolina, híbrido o eléctrico, y cambios finos serían elegir la gasolina particular a usar, por ejemplo. Finalmente, una variable de baja importancia podría ser la cilindrada del vehículo de gasolina elegido.

Las fases de jerarquía y optimización de variables constituyen el núcleo de un modelo de optimización estructurado de múltiples atributos. Su importancia se deriva del hecho de que el número de evaluaciones de la función objetivo se reduce de manera robusta y eficiente, si la selección de variables en cada nivel jerárquico y los niveles particulares de ajuste bruto y fino están bien seleccionados.

Además, los algoritmos de optimización, los métodos de evaluación o las herramientas utilizadas pueden diferir de una fase a otra, según lo decidido internamente por el algoritmo.

5. BÚSQUDA DIRECTA Y METAHEURÍSTICOS

El algoritmo de optimización necesita un conjunto de reglas metaheurísticas para determinar cómo moverse a través de la región de búsqueda, para las diferentes jerarquías de variables, tipos de variables (discretas o continuas) y fases de optimización. Esta sección dará una visión general de estas reglas.

La optimización comienza con la Fase 0. Esta fase lleva a cabo una exploración de diseño inicial y simplificada, estableciendo diferentes valores para las variables de importancia alta y media y con valores fijos para las variables de baja importancia.

Al definir esta fase, la experiencia del ingeniero es crítica, ya que esta exploración de diseño debe ser lo suficientemente amplia como para explorar todo el área de la región de búsqueda donde se podrían encontrar puntos óptimos. El algoritmo de optimización refinará la búsqueda en cada fase de optimización, pero siempre condicionada por los resultados de la fase anterior. El uso de una exploración de diseño muy amplia sólo se recomienda en los casos en los que haya una alta incertidumbre sobre dónde pueden encontrarse los óptimos, ya que aumenta el tiempo de cálculo considerablemente.

Para el caso presentado en este trabajo, para ilustrar cómo funciona el modelo de optimización:

1. Se eligen dos valores para la posición relativa del ventilador y de la sección de ensayo.
2. Dos diámetros de ventilador (uno por debajo y uno por encima de un diámetro nominal recomendado).
3. Dos geometrías para la sección de ensayo (cuadrada o circular).
4. Dos geometrías para el perfil del conducto 1 (una casi circular y otra más apuntada). El conducto 1 es el conducto que une la sección de ensayo y el ventilador y que está aguas abajo de la sección de ensayo.
5. Finalmente, dos geometrías (cuadrada o circular) para las secciones transversales del conducto 1.

El conducto 2 se mantiene constante. Esto genera un árbol de 32 diseños de túnel de viento (Figura 3). Estos puntos de diseño se evaluarán utilizando ANSYS FLUENT v17.

A partir de los resultados de la fase 0, el algoritmo debe decidir cómo proceder a la optimización en sí. Las subsecciones siguientes explican la estrategia general propuesta para las búsquedas sucesivas en cada fase, ya que es una mezcla de métodos de tipo gradiente, genéticos y búsqueda de enjambre.

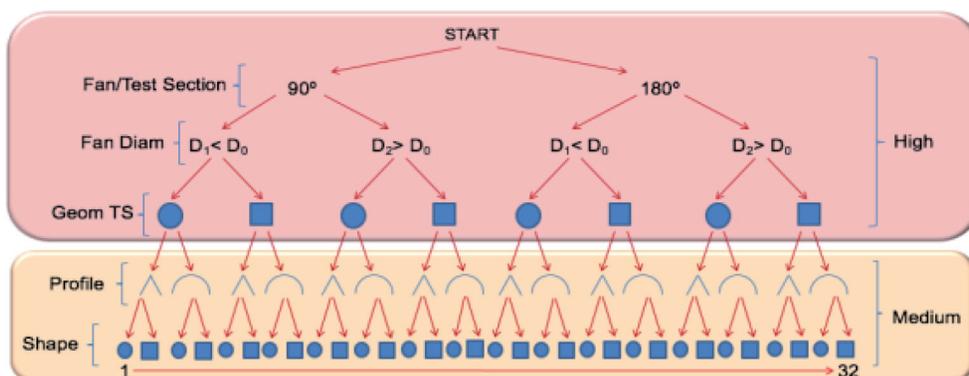


Fig. 3: Ejemplo de fase de exploración de diseño (32 diseños de túnel de viento)

1. Umbral de tolerancia de Pareto

El primer paso es calcular el frente de Pareto para las soluciones de la exploración de diseño inicial. Debido a que las soluciones en el frente de Pareto pueden no ser los únicos diseños que vale la pena considerar para las fases de optimización subsiguientes, se establece un umbral de tolerancia. Los diseños dentro de esta área de la región de búsqueda podrían evolucionar para ser diseños óptimos del túnel de viento.

El umbral se define en términos de tolerancias permitidas para cada atributo seleccionado. Los atributos seleccionados en este caso son la caída de presión total y el coste fijo, aunque se puede elegir cualquier número de atributos en un ejemplo más general.

Estas tolerancias se aplican a cada una de las soluciones en el frente de Pareto, como se muestra en la Figura 4, y se dibuja un nuevo frente de Pareto o curva de tolerancia para definir un área de la región de búsqueda donde las siguientes fases de optimización buscarán diseños óptimos. Una vez que se dibuja la curva de tolerancia, como se muestra en la Figura 4, todas las soluciones que se encuentran entre esta curva y el frente de Pareto son soluciones candidatas potenciales que se conservan para la siguiente fase de optimización. No se utiliza dominancia estricta ni criterios de dominancia significativa, para conservar diseños adicionales y potencialmente interesantes (ver los trabajos de [35] y [36] para un análisis sobre estos criterios de dominancia).

Entre todas estas soluciones seleccionadas, no todas serán consideradas para la siguiente fase de optimización, como se explica a continuación, ya que las evaluaciones CFD consumen mucho tiempo.

2. Selección de dirección (es) de búsqueda

En primer lugar, el algoritmo busca las soluciones más cercanas en el frente de Pareto a cada diseño candidato. Éstas son potencialmente buenas direcciones de búsqueda propuestas por CHDS para continuar con la optimización. El diseñador debe elegir, al configurar el problema, el número de soluciones más cercanas que se utilizarán para determinar la dirección de búsqueda de un diseño candidato en particular. Puede elegir usar la solución más cercana en el frente de Pareto, o las dos más cercanas, o más, o puede permitir que el algoritmo lo elija automáticamente para cada fase.

En esta etapa, se debe seleccionar el conjunto reducido de soluciones que realmente se utilizarán para la siguiente fase de optimización. Esta selección tiene en cuenta, para posibles puntos candidatos que se mueven hacia el mismo punto en el frente de Pareto, la distancia entre ellos, tanto en el espacio de variables como en el espacio de atributos. Se aplican técnicas de *clustering* para seleccionar el más representativo de estos diseños potenciales, si corresponde. Este uso del *clustering* es similar al proceso utilizado en las metodologías de búsqueda de enjambre.

Si varias soluciones están cerca en el espacio de atributos, pero muy alejadas en el espacio de variables, todas deben mantenerse, porque representan diseños diferentes y enriquecen el proceso de búsqueda (se propone un enfoque similar en [35]).

Las soluciones descartadas de las fases de optimización intermedia, de todas maneras, no se eliminarán completamente y se mantendrán, en caso de que el algoritmo decida que todavía pueden ser candidatos interesantes.

3. Selección de la (s) variable (s) de búsqueda

En función de la dirección(es) de búsqueda definida(s), el algoritmo determina las variables que difieren entre el punto de diseño considerado y su punto(s) de Pareto más cercano(s). Estas varia-

bles serán modificadas para generar un nuevo diseño candidato a partir del cruce de sus dos padres.

4. Cálculo de los incrementos de las variables

Una vez que se han determinado las direcciones de búsqueda y la variable o variables a cambiar, el algoritmo determina la cantidad en que se modifica cada variable. Para ello, el algoritmo verificará el tipo de variable (es decir, la jerarquía) y la fase de optimización e introducirá incrementos de valor para cada una de las variables según la Figura 2 (los factores particulares son establecidos por el diseñador o establecidos automáticamente).

5. Simulaciones para la fase I

Una vez que se han realizado los pasos 1-4 para todos los diseños seleccionados dentro del umbral de Pareto de la fase 0, se simulan las nuevas soluciones candidatas y se determina un nuevo frente de Pareto.

En el ejemplo de este trabajo, 27 modelos habrían sido evaluados para la fase I, en comparación con 32 modelos para la fase 0. Entre estos 27 modelos, 10 de ellos eran idénticos y cinco eran absurdos y por lo tanto fueron descartados automáticamente por procedimientos internos de chequeo del algoritmo. En resumen, se seleccionaron 12 modelos para simular por CFD.

6. Otras fases de optimización

Para pasar a la fase II de optimización y a todas las fases subsiguientes, el algoritmo repite los pasos 1-5 hasta que se cumplan los criterios de finalización definidos. Por ejemplo, el usuario puede seleccionar un número máximo de evaluaciones (o tiempo máximo de cálculo) y el algoritmo puede estimar el número de fases y soluciones que deben conservarse para cada fase para cumplir con ese objetivo de tiempo lo más ajustadamente posible (aspectos como los criterios de refinado de malla para cada fase, etc.).

Para un mejor ajuste fino de cada solución del frente de Pareto obtenido para las últimas fases de optimización, se propone el uso del método de adjuntos para cada uno de los diseños candidatos.

Para resumir, el algoritmo de optimización CHDS presentado es híbrido en el sentido de que utiliza técnicas basadas en gradientes para definir el frente de Pareto y seleccionar la dirección de búsqueda; y un enfoque genético, siendo el criterio de aptitud el umbral de tolerancia y la estrategia de cruce el método descrito de modificación del valor de cada variable entre los dos diseños padre. Se utiliza la inteligencia de búsqueda de enjambre, como se mencionó, siempre que se aplique el *clustering*. En el algoritmo propuesto no hay mutación ya que todas las soluciones hijas se obtienen de dos padres. Se podría incluir, sin embargo, si se considera conveniente.

La novedad del enfoque CHDS propuesto se deriva del hecho de que, a diferencia de la mayoría de otros autores que han combinado algoritmos basados en gradiente y sin gradiente (ejemplos relevantes son [37-39]), el CHDS no cambia de un tipo de algoritmo al otro dependiendo de cómo vaya avanzando la optimización, sino que combina elementos de ambos tipos de algoritmo en cada fase.

Los principales resultados del ejemplo de estudio de este documento se muestran en las Figuras 4 a 6. Las Figuras 7 y 8 representan dos túneles de viento real desarrollados con la metodología presentada.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

1. Se presenta una nueva metodología de optimización estructurada de múltiples atributos para el diseño aerodinámico

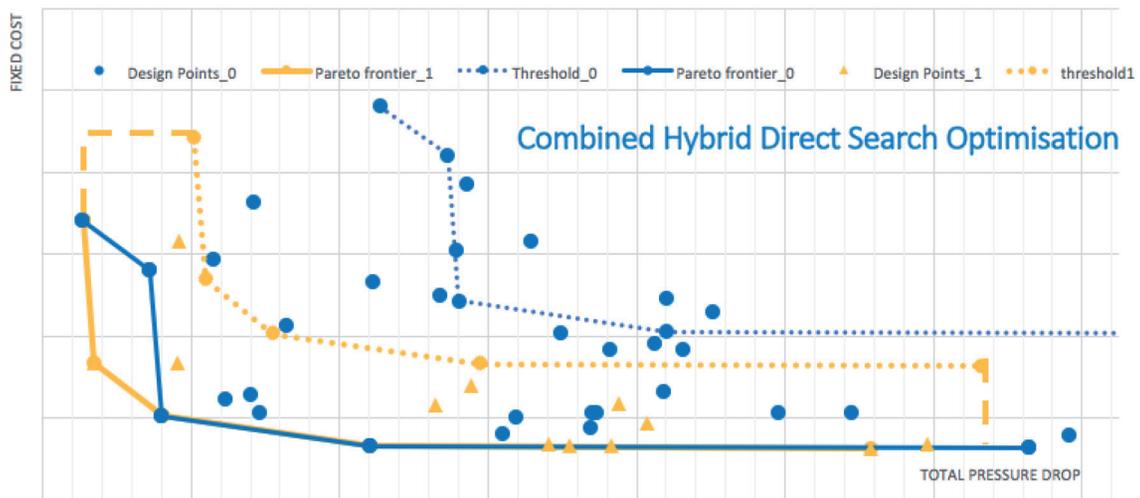


Fig. 4: Resultados obtenidos para un problema de optimización de diseño en dos fases de túnel de viento realizado con el algoritmo combinado de búsqueda directa híbrida (CHDS, en inglés) propuesto en este trabajo. Se puede observar la mejora del frente de Pareto a lo largo del proceso de optimización y las soluciones de las fases 0 y 1

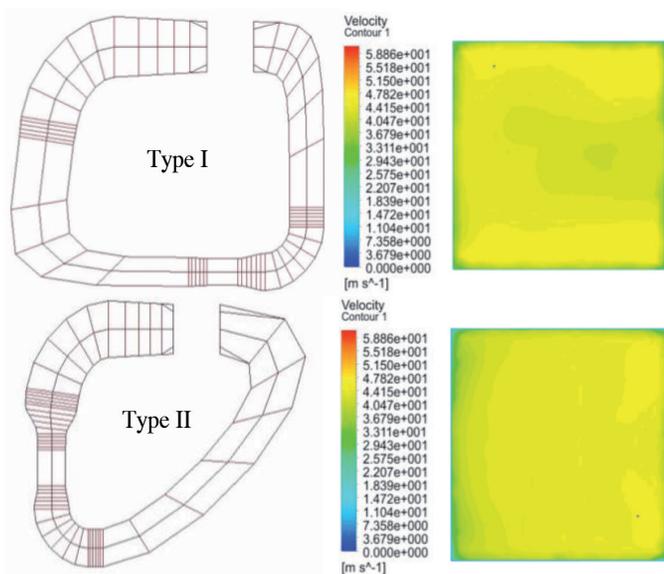


Fig. 5: Familias de modelos de túnel de viento en el frente de Pareto para la fase 0 y sus contornos de velocidad en la sección de ensayo del túnel. El frente de Pareto para esta fase tiene 5 puntos de diseño, 2 de tipo I y 3 de tipo II. El índice de velocidad en la sección de ensayo (diferencia entre los valores mínimo y máximo y la velocidad media) de los puntos de diseño simulados oscila entre el 5-7%. Sin ningún medio para mejorar la uniformidad del flujo y reducir los niveles de turbulencia en esta etapa (honeycombs o screens), éstos son índices de velocidad razonables para esta fase de la optimización

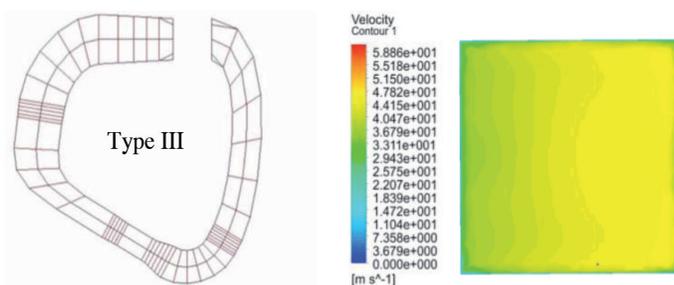


Fig. 6: Nueva familia de modelos de túnel de viento en el frente de Pareto para la fase I y su contorno de velocidad en la sección de ensayo del túnel (índice de velocidad 5-7%). El frente de Pareto para esta fase tiene 5 puntos de diseño, 1 de tipo I, 3 de tipo II y 1, diseño bastante no convencional, de tipo III. El tipo III tiene una posición relativa de 120° entre el ventilador y la sección de ensayo. Este tipo de diseño probablemente nunca habría sido probado manualmente por la mayoría de los diseñadores expertos



Fig. 7: Túnel de viento para pruebas y propósitos educativos desarrollado con la metodología presentada



Fig. 8: Túnel de viento vertical para paracaidismo interior desarrollado con la metodología presentada

avanzado. Propone la búsqueda directa híbrida combinada (CHDS) para realizar una selección robusta y eficiente de las soluciones candidatas a ser evaluadas por CFD.

2. Los resultados obtenidos para un problema de optimización de diseño en dos fases de túnel de viento realizado con el algoritmo CHDS se presentan como un caso de estudio. Se puede ver claramente cómo los puntos de diseño de la fase I mejoran los resultados obtenidos para la fase 0. Además, algunos de los diseños que producen resultados óptimos son diseños sustancialmente no convencionales que el diseñador probablemente nunca habría probado por sí mismo.
3. En el diseño de túnel de viento, el enfoque presentado permite multiplicar por 1 a 2 órdenes de magnitud el número habitual de soluciones evaluadas y puede reducir el tiempo de proyecto hasta 5-10 veces.
4. El uso de esta nueva metodología de optimización en muchos campos de la aerodinámica permitirá la exploración de diseños no convencionales, por ejemplo en aplicaciones tales como las descritas en [24] o [40].

5. En futuros trabajos se abordarán aspectos como el ajuste fino de la configuración del modelo (umbrales de tolerancia, etc.), para asegurar que el proceso de optimización sea aún más robusto y / o eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Prada-Nogueira I, De Cuadra F, and Sánchez-Miralles A. "Towards a general model for automatic and flexible design of closed wind tunnels". Internal publication. Institute for Research in Technology IIT-15-154A. http://www.iit.upcomillas.es/publicaciones/mostran_publicacion_working_paper.php.en?id=259. 2015.
- [2] Bell JH, and Mehta RD. "Boundary-layer Predictions for Small Low-speed Contractions". *AIAA Journal* (ISSN 0001-1452). 1988. Vol. 27-3. p372-374.
- [3] Borger GG. "The Optimisation of Wind Tunnel Contractions for the Subsonic Range". NASA Technical Translation / F-16899, NASA Washington. 1976.
- [4] Doolan CJ, and Morgans RC. "Numerical Evaluation and Optimisation of Low Speed Wind Tunnel Contractions". Paper presented at the 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, FL, July 25-28. 2007.
- [5] Downie JH, Jordinson R, and Barnes FH. "On the Design of Three-dimensional Wind Tunnel Contractions". *Aeronautical Journal*. 1984. Vol. 88. p287-295.
- [6] Jordinson R, and DIC. "Design of Wind Tunnel Contractions: A Method Based on the Use of the Schwarz-Cristoffel Transformation for Incompressible Inviscid Flow". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1961. Vol. 33-10. p294-297.
- [7] Mikhail MN. "Optimum Design of Wind Tunnel Contractions" *AIAA Journal*. 1979. Vol. 17-5. Article no. 78-819.
- [8] Morel T. "Design of Two-dimensional Wind Tunnel Contractions". *ASME Journal of Fluids Engineering*. 1977. Vol. 99. p371-378.
- [9] Vieira EDR, and Aparecido JB. "Design and Construction of Small Axisymmetric Contractions". In 5ª Reunión do Grupo De Trabajo Sobre Hidromecánica publication, 103-116. 1999.
- [10] Drela M, and Youngren H. A Users Guide to MISES 2.1. MIT Computational Aerospace Sciences Laboratory. 1995.
- [11] Eckert WT, Wettlaufer BM, and Mort KW. "The Aerodynamic Performance of Several Flow Control Devices for Internal Flow Systems". NASA Technical Paper 1972, AVRADCOM Technical Report 82-A-2. 1982.
- [12] Friedman D, and Westphal WR. "Experimental Investigation of a 90° Cascade Diffusing Bend with an Area Ratio of 1.45:1 and with Several Inlet Boundary Layers". NACA Technical Note 2668. 1952.
- [13] Giles MB, and Drela M. "Two-Dimensional Transonic Aerodynamic Design Method". *AIAA Journal*. 1987. Vol. 25. p1199-1206.
- [14] Jeong S, Murayama M, and Yamamoto K. "Efficient Optimisation Design Method Using Kriging Model". *Journal of Aircraft*. 2005. Vol. 42-2. March-April.
- [15] Lindgren B, Österlund J, and Johansson AV. "Measurement and Calculation of Guide-vane Performance in Expanding Bends for Wind-Tunnels". *Experiments in Fluids*. 1998. Vol. 24. p265-272.
- [16] Youngren H, and Drela M. "Viscous/Inviscid Method for Preliminary Design of Transonic Cascades". Paper presented at the 27th AIAA, SAE, ASME, and ASEE Joint Propulsion Conference. 1991.
- [17] Abbaspour M, and Shojaei MN. "Innovative Approach to Design a New National Low Speed Wind Tunnel". *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2009. Vol. 6-1. p23-34.
- [18] Eckert WT, Mort KW, and Jope J. "Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance". NASA Technical Note / D-8243, NASA Washington. 1976.
- [19] González MA, Moreno AI, Jarzabek AA, et al. "Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel" In *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*, edited by Dr. Noor Ahmed, ISBN: 978-953-51-1047-7. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/54169>.
- [20] Forti D, and Rozza G. "Efficient Geometrical Parameterization Techniques of Interfaces for Reduced-order Modelling: Application to Fluid-structure Interaction Coupling Problems". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2014. Vol. 28-3-4. p158-169. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10618562.2014.932352>.
- [21] Hicken JE, and Zingg DW. "Aerodynamic Optimisation Algorithm with Integrated Geometry Parameterization and Mesh Movement". *AIAA Journal*. 2010. Vol. 48-2. February.
- [22] Krajnovic S. "Aerodynamic Optimisation of Vehicles Using Computational Fluid Dynamics and Response Surface Methodology". Paper presented at the 21st International JUMV Automotive Conference SCIENCE & MOTOR VEHICLES (Paper NMV0724), Beograd. 2007.
- [23] Mengistu T, and Ghaly W. "Aerodynamic Optimisation of Turbomachinery Blades Using Evolutionary Methods and ANN-based Surrogate Models". *Optimisation and Engineering*. 2008. Vol. 9. p239-255.
- [24] Paniagua J. "Aerodynamic Optimisation of the Nose Shape of a High-Speed Train". PhD diss., Technical University of Madrid. 2014.
- [25] Washabaugh K, Amsellem D, Zahr M, et al. "Nonlinear Model Reduction for CFD Problems Using Local Reduced Order Bases". Paper presented at the 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, New Orleans, LA, June 25-28. 2012.
- [26] Chao T, Li N, Gong G, et al. "A Parameterized Geometry Design Method for Inward Turning Inlet Compatible Waverider". *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol. 26-5. p1135-1146. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2013.07.003>.
- [27] Liu X, and Zhang Z. "A Hybrid Reliability Approach for Structure Optimisation Based on Probability and Ellipsoidal Convex Models". *Journal of Engineering Design*. 2014. Vol. 25-4-6. p238-258. DOI: 10.1080/09544828.2014.961060.
- [28] Zhou Q, Shao X, Jiang P, et al. "A Deterministic Robust Optimisation Method Under Interval Uncertainty Based on the Reverse Model". *Journal of Engineering Design*. 2015. Vol. 26-10-12. p416-444. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09544828.2015.1072763>.
- [29] Marduel X, Tribes C, and Trépanier J-Y. "Variable-fidelity Optimisation: Efficiency and Robustness". *Optimisation and Engineering*. 2006. Vol. 7-4. p479-500. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11081-006-0351-3>.
- [30] Robinson TD, Eldred MS, Willcox KE, et al. "Strategies for Multifidelity Optimisation with Variable Dimensional Hierarchical Models". Paper presented at the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, May 1-4. 2006.
- [31] Schaumont P, and Verbauwhe I. "Interactive Cosimulation with Partial Evaluation". Paper presented at the 7th Design, Automation on Test in Europe Conference (DATE'04), Paris, France. 2004.
- [32] Babu A. "Power Optimisation Techniques at Circuit and Device Level in Digital CMOS VLSI - A Review". *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2014. Vol. 3-11. p375-379.
- [33] Held S, Korte B, Rautenbach D, et al. "Combinatorial Optimisation in VLSI design". Paper presented at the 45th Session of the Séminaire de Mathématiques Supérieures, Montréal, June 19-30. 2006.
- [34] Du X, and Chen W. "Sequential Optimisation and Reliability Assessment Method for Efficient Probabilistic Design". *Journal of Mechanical Design*. 2004. Vol. 126. p225-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1649968>.
- [35] De Cuadra F. "El problema general de la optimización de diseño por ordenador: aplicación de técnicas de ingeniería del conocimiento [The General Problem of Computer-based Design Optimisation: Application of Knowledge Engineering Techniques]". PhD diss., Pontificia COMILLAS-ICAI University. 1990.
- [36] Schweppe FC, and Merrill HM. "Multiple Attribute Trade-Off Analysis". EPRI RP 2537, April. 1986.
- [37] Guliashti V. "A Hybrid Direct Search - Quasi-Newton Method for the Inverse EIT Problem". *Bulgarian Academy of Sciences. Cybernetics and Information Technology*. 2008. Vol. 8-2.
- [38] Hegazi HA, Nassef AO, and Metwalli S. "Shape Optimization of NURBS Modeled 3D C-Frames Using Hybrid Genetic Algorithm". *ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>.
- [39] Hsiao CT, Chahine G, and Gumerov N. "Application of a Hybrid Genetic/Powell Algorithm and a Boundary Element Method to Electrical Impedance Tomography". *Journal of Computational Physics*. 2001. Vol. 173. p433-454. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2001.6866>.
- [40] Zamorano-Rey G, Garro B, Fernández-Gámiz U, et al. "A computational study of the variation of the incidence angle in a vortex generator". *DYNA New Technologies*. 2015. Vol. 2-1. p1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a los ingenieros de investigación Dr. I. Serrano, P.J. Cancillo y E. Martín de KeelWit Technology (ESPAÑA), por sus valiosas aportaciones.