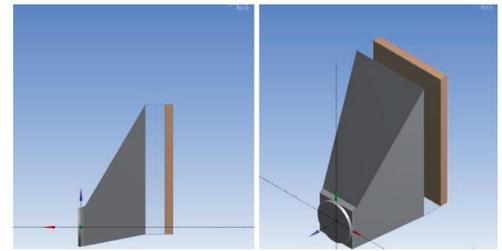


Optimización del diseño de la geometría del conducto de entrada de calderas de plantas de ciclo combinado



Boiler inlet duct shape design optimization for combined cycle power plants



Isaac Prada-i-Nogueira¹, Francisco-Javier Álvarez-Ruiz², Fernando De-Cuadra³ y Alvaro Sánchez-Miralles³

¹ KeelWit Technology S.L. Avda. Presidente Carmona, 2 - 28020 Madrid. Tfno: +34 917 105836.

² AMEC Foster Wheeler Energía. Calle Gabriel García Márquez, 2 - 28232 Rozas de Madrid (Madrid).

³ ICAI. Institute for Research in Technology. Calle de Alberto Aguilera, 25 - 28015 Madrid. Tfno: +34 915 422800.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8250> | Recibido: 16/12/2016 • Evaluado: 21/12/2016 • Aceptado: 15/02/2017

ABSTRACT

• A particular kind of industrial boilers, referred to as Heat Recovery Steam Generators (HRSGs), are used in combined cycle power plants to recover part of the heat of the exhaust gases of a gas turbine to generate steam and power a steam turbine. Ever since the use of HRSGs for power plants, the shape design of the inlet duct at the entrance to these units, one of their most critical components, has followed greatly unchanged design guidelines. The contribution of this paper is twofold: on the one hand, it shows that there is substantial room for improvement in the shape design of the inlet ducts of HRSGs, in terms of achieving a lower pressure drop, a higher velocity uniformity and an important cost reduction of the unit; on the other hand, it shows how the application of the Combined Hybrid Direct Search (CHDS) algorithm, applicable in many fields for aerodynamic shape optimization involving big displacements, can find these improved designs, which can be quite unconventional and non-intuitive. The CHDS algorithm combines genetic, gradient and swarm search intelligence in every iteration. The results obtained for the two HRSG families presented show that there are optimum trade-off design points with simultaneous reductions in pressure drop of up to 20-25%, in lateral surface of up to 38% and in length of up to 16%, while having comparable velocity uniformities to the existing designs.

• **Keywords:** aerodynamic optimization, optimization methodology, multi-attribute, hybrid direct search, geometry parameterization, computational fluid dynamics, heat recovery steam generators.

RESUMEN

Un tipo particular de calderas industriales, denominado calderas generadoras de vapor por recuperación de calor (HRSGs, en sus siglas en inglés), se utiliza en centrales de ciclo combinado para recuperar parte del calor de los gases de escape de una turbina de gas, generar vapor y alimentar una turbina de vapor. Desde el comienzo del empleo de los HRSG para centrales eléctricas, el diseño de la geometría del conducto de entrada a estas unidades, uno de sus componentes más críticos, ha seguido pautas que han evolucionado muy poco. La contribución de este trabajo es doble: por un lado, muestra que existe un potencial sustancial para mejorar el diseño de la forma de los conductos de entrada de los HRSG, en términos de lograr una menor caída de presión, una mayor unifor-

midad de velocidad y una reducción importante del coste global de la caldera; por otro lado, muestra cómo la aplicación del algoritmo combinado de búsqueda directa híbrida (CHDS, en sus siglas en inglés), aplicable en muchos campos para optimización aerodinámica de geometrías, permitiendo grandes desplazamientos, puede encontrar estos diseños mejorados, que pueden ser bastante poco convencionales y no intuitivos. El algoritmo CHDS combina inteligencia genética, de búsqueda de gradiente y de búsqueda de enjambre en cada iteración. Los resultados obtenidos para las dos familias de HRSG presentadas muestran que hay puntos óptimos de diseño con reducciones simultáneas en la caída de presión de hasta el 20-25%, en superficie lateral de hasta el 38% y en longitud de hasta el 16%, manteniendo niveles de uniformidad de velocidad comparables a diseños existentes.

Palabras clave: optimización aerodinámica, metodología de optimización, multi-atributo, búsqueda directa híbrida, parametrización geométrica, dinámica de fluidos computacional, calderas generadoras de vapor por recuperación de calor.

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores de vapor por recuperación de calor (HRSG, por sus siglas en inglés) para plantas de ciclo combinado son un equipo industrial clave en el sector de generación de energía. Están diseñados y fabricados por grandes empresas de ingeniería y su precio es elevado, tienen un gran tamaño y son cruciales para el rendimiento de la planta de energía. Sin embargo, el diseño de ciertos componentes críticos, como el conducto de entrada, ha permanecido prácticamente inalterado durante muchas décadas. El comportamiento de estos equipos se mide principalmente en términos de caída de presión en toda la unidad, uniformidad de la velocidad del flujo de gases de escape y capacidad de transferencia de calor.

En un HRSG, los gases de escape calientes de una turbina de gas fluyen a través de un conjunto de tubos (normalmente tubos con aletas) a través de los cuales se bombea agua. El calor del flujo de gas se transfiere al flujo de agua, que se transforma en vapor. Este vapor se puede utilizar directamente para aplicaciones industriales o para la generación de electricidad en una turbina de vapor, o para ambos (en las llamadas plantas de cogeneración).

La Figura 1 muestra un ejemplo de disposición de una central eléctrica de ciclo combinado, un ejemplo de un HRSG real y varios tipos de diseño de conducto de entrada, junto con una distribución de flujo de velocidad de ejemplo dentro de un HRSG.

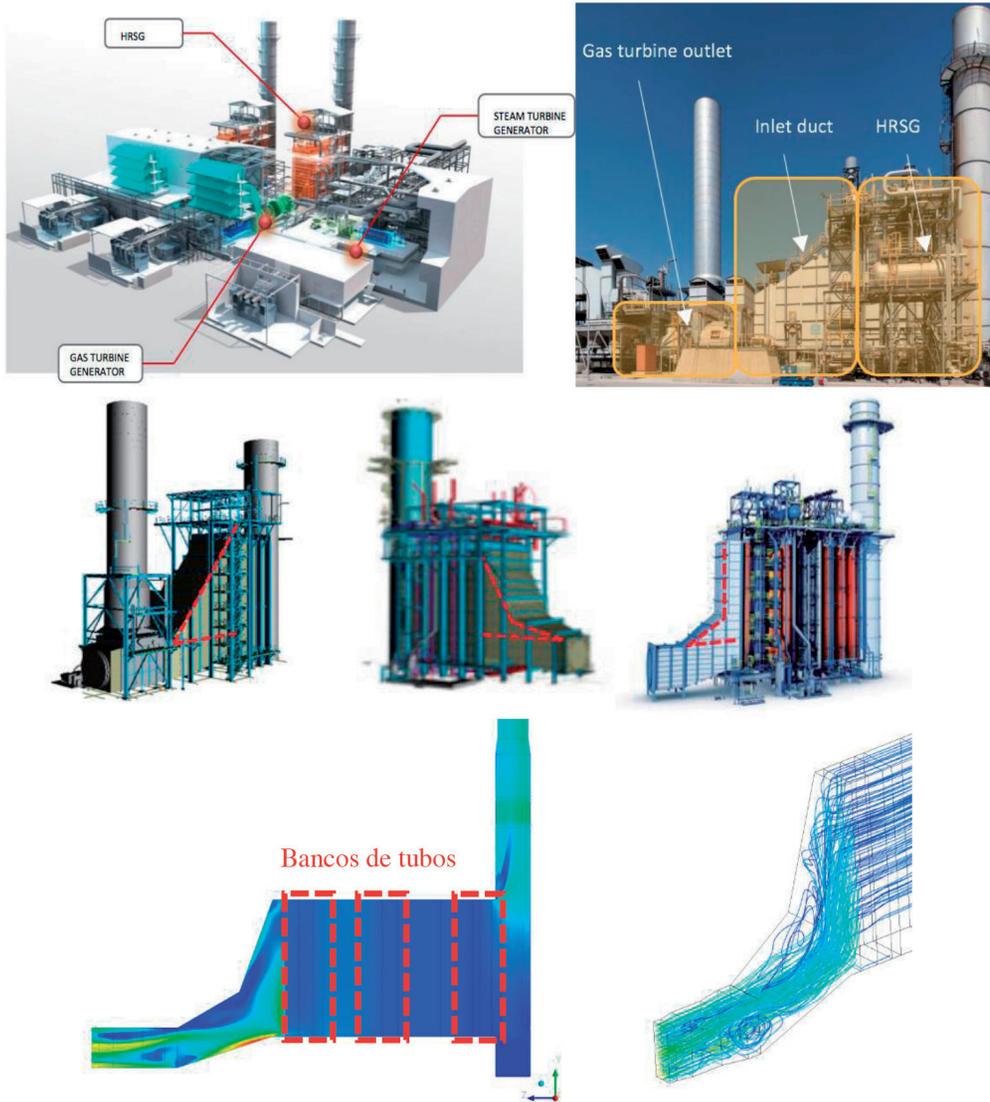


Fig. 1: Ejemplos de un diseño de planta de ciclo combinado y un HRSG real (arriba). A continuación, los tipos de diseño de conducto de entrada de HRSG más utilizados en la industria (de izquierda a derecha): conducto de entrada de ángulo único, conducto de entrada de ángulo doble y tipo de diseño alternativo que algunos fabricantes están empezando a utilizar. En la parte inferior, vista lateral de los contornos de velocidad en el plano medio de un HRSG típico (izquierda), que ilustra la posición de los diferentes bancos de tubos; vista isométrica detallada de las líneas de corriente de velocidad en el conducto de entrada (derecha). Los valores de velocidad varían de 0 (azul) a 100 m/s (rojo) - la escala detallada no se puede incluir por razones de confidencialidad

El principal desafío en esta aplicación es que el flujo de gases de escape que sale de la turbina de gas tiene que fluir hacia el HRSG, que tiene un área transversal mucho más grande, a través de una sección crítica y de longitud reducida, el denominado conducto de entrada. Esto introduce desprendimiento de flujo y, por tanto, no uniformidad en la turbulencia y la velocidad, lo que se puede observar en la Figura 1. Adicionalmente, el perfil de velocidad a la salida de la turbina de gas, dependiendo de su uniformidad de velocidad, turbulencia y otras características, influye de manera importante en el comportamiento del flujo a través del HRSG. A pesar de esto, todos los fabricantes intentan hacer que este conducto de entrada sea lo más corto posible, para que sus unidades sean más compactas, intentando mantener la caída de presión del gas y la uniformidad del perfil de velocidad dentro de ciertos límites. Además, la reducción del tamaño del conducto de entrada puede reducir considerablemente los costes de fabricación, ya que esta sección está construida de acero inoxidable, que es un material costoso (actualmente, el coste promedio de fabricación de un conducto de entrada de HRSG es de alrededor de 450 \$/m²).

A lo largo de las décadas, los conductos de entrada de HRSG han sido diseñados siguiendo en gran medida las mismas tendencias de diseño. Este trabajo se centra en la optimización del diseño de la geometría del conducto de entrada de diferentes familias de HRSG, gracias a la aplicación del algoritmo CHDS presentado en ¹.

En términos generales, el diseño de un conducto de entrada de HRSG siempre ha sido de uno de los dos tipos mostrados en la Figura 1 (centro izquierda y centro medio).

Sin embargo, ciertos fabricantes han empezado a usar diseños alternativos de conductos de entrada, como se puede ver en la Figura 1 (centro derecha), pero no se han realizado extensos análisis de diseño, hasta donde estos autores conocen, para comparar las diferentes alternativas de diseño de conductos de entrada.

Hay una serie de obras en el área de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) de modelado de un conducto de entrada de HRSG, pero no se ha encontrado un análisis de optimización de la geometría completa de este elemento crítico. El objetivo de estos trabajos es analizar la distribución del flujo de un diseño particular o los efectos de elementos introducidos en el conducto de entrada para mejorar la distribución del flujo, tales como ² y ³. Trabajos más generales en el campo del análisis CFD de HRSG completos se pueden encontrar en ⁴⁻¹⁰.

El objetivo de aplicar el algoritmo CHDS al diseño de un HRSG es generar geometrías optimizadas para los conductos de entrada de una amplia gama de familias de HRSG, lo que puede mejorar las líneas de tendencia de diseño actuales y ofrecer mejores niveles de prestaciones, con unidades más compactas y más cortas, manteniendo una buena uniformidad de velocidad en la entrada del HRSG. Esta es la principal contribución de este documento.

El artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 1 describe el problema de optimización del diseño de la geometría de un conducto de entrada parametrizado genérico de un HRSG; la Sección 2 describe los principales resultados obtenidos para dos familias de HRSG con el algoritmo de optimización CHDS y ofrece un análisis en profundidad de los resultados; finalmente, la Sección 3 resume las principales conclusiones extraídas de este trabajo y presenta los trabajos futuros que se llevarán a cabo en este ámbito.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

El objetivo de este trabajo es obtener diseños óptimos para el conducto de entrada de un conjunto de familias de HRSG. Este problema de optimización es multi-atributo o multi-objetivo, ya que el objetivo final es obtener los diseños de conductos de entrada que minimicen dos atributos: caída de presión total a través del conducto de entrada y no uniformidad de velocidad en el plano de salida del conducto de entrada.

La caída de presión se mide como la diferencia del promedio ponderado en flujo másico de la presión total entre la entrada y la salida del conducto de entrada.

La no uniformidad de velocidad se define como la diferencia entre la velocidad obtenida mediante el promedio ponderado por el área y la velocidad calculada mediante el promedio ponderado en flujo másico. Esta definición es simplemente una de las formas posibles de medir la no uniformidad de la velocidad. Otras definiciones alternativas serían, por ejemplo, la comprobación de la diferencia entre la velocidad máxima, la velocidad mínima y la velocidad media (como se hace para los índices de velocidad, por ejemplo). Sin embargo, estas definiciones alternativas, que implican el uso de los valores de velocidad máxima y mínima, pueden ser engañosas, ya que irregularidades menores de la malla, inevitables en la mayoría de las simulaciones de CFD, pueden dar valores falsos de velocidades máximas o mínimas. Estos valores son errores numéricos aceptables y pueden ser descartados fácilmente por el ingeniero al evaluar los resultados manualmente, pero no pueden ser detectados de manera sencilla por el código CFD al iniciar una optimización automática. Por lo tanto, se utiliza la definición indicada de no uniformidad de velocidad. Debe observarse que, estrictamente hablando, por no uniformidad de velocidad, no nos referimos solamente al hecho de que los valores de velocidad sean uniformes en el plano de salida del conducto de entrada, sino al hecho de que el flujo másico también se distribuya uniformemente. Esta "combinación" de uniformidad de velocidad y del flujo másico es precisamente lo que refleja la diferencia entre

la velocidad obtenida mediante el promedio ponderado por el área y la velocidad calculada mediante el promedio ponderado en flujo másico.

Ambos atributos se manejan por unidad de magnitud, por lo que el hecho de que los valores de magnitud absoluta de cada atributo tengan un rango diferente no afecta al proceso de optimización o a los resultados finales. Los diseños óptimos son aquellos que minimizan ambos atributos.

La geometría del conducto de entrada está parametrizada como se muestra en la Figura 2. Las variables utilizadas son: dos ángulos para la pared superior, dos ángulos para la pared lateral (idénticos en ambas paredes laterales), dos más para la pared inferior y la longitud total del conducto de entrada. Estas variables toman en consideración las modificaciones de diseño que son factibles en términos de fabricación y montaje en centrales eléctricas reales. Por ejemplo, las paredes curvas o un mayor número de ángulos intermedios no se consideran de interés y, por consiguiente, no se incluyen en este análisis.

3. PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN CHDS

Esta sección ilustra la aplicabilidad del algoritmo CHDS (como se describe en detalle en ¹) a otros campos en los que se puede utilizar con éxito la optimización de la geometría de un objeto o equipo y diferentes a los túneles de viento analizados en ¹. En concreto, se aplica CHDS a la optimización del diseño de los conductos de entrada del HRSG para centrales de ciclo combinado.

Aunque CHDS se explica en profundidad en ¹, aquí se incluye un breve resumen para mayor comodidad del lector. La Figura 4 (parte superior) ilustra los pasos principales seguidos por un procedimiento general de optimización CHDS:

1. La fase 0 es la fase de exploración de diseño, en la que se generan y calculan una serie de puntos de diseño para tener una representación inicial del espacio de los atributos (es decir, el espacio de prestaciones). Estos puntos pueden ser generados por medio de cualquier técnica de Diseño de Experimentos (DoE), u otros métodos.
2. Se calcula un primer frente de Pareto, para agrupar los diseños óptimos para la fase 0. El frente de Pareto es una herramienta muy útil para problemas de optimización verdaderamente multi-atributo, como se comenta a continuación.
3. Se genera automáticamente un umbral de tolerancia, definido por el diseñador, para agrupar los puntos candidatos que se seleccionarán para la siguiente fase. Se puede aplicar *clustering* para seleccionar puntos representativos entre un grupo de puntos de diseño muy similares (tanto en el espacio de variables como en el espacio de atributos).
4. Se realiza un cruzamiento (*crossover*) entre cada punto de diseño seleccionado y su(s) punto(s) más cercano(s) en el frente de Pareto. El cruzamiento está controlado por los denominados factores de incremento, que se ajustan automáticamente para mejorar la velocidad de optimización y el resultado final.
5. Por lo tanto, se genera un nuevo conjunto de puntos de diseño. Estos puntos constituyen la fase I.
6. Se calcula un nuevo frente de Pareto. La optimización ha tenido éxito si el nuevo frente de Pareto mejora el frente de Pareto de la fase 0.
7. Este procedimiento puede repetirse tantas veces (es decir, fases) como establezca el diseñador o el algoritmo.

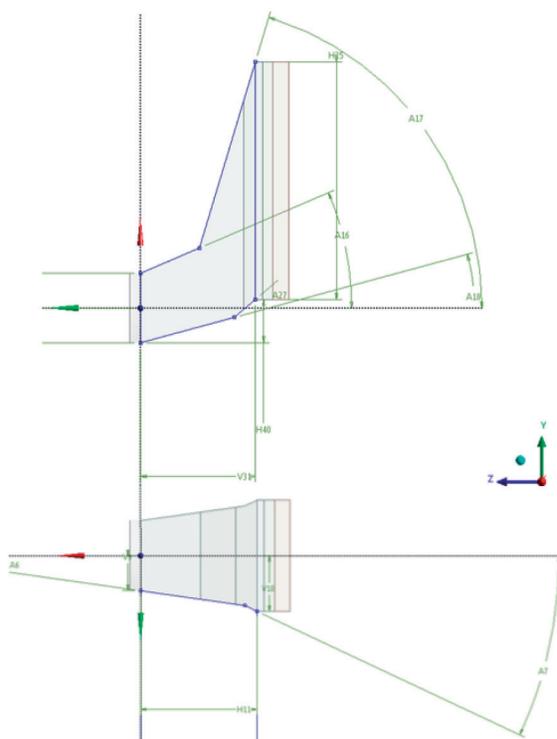


Fig. 2: Variables utilizadas para parametrizar un conducto de entrada general para diferentes familias de HRSG (vistas lateral y superior)

CHDS explora los conceptos de jerarquía de variables (permitiendo variables continuas y no continuas) y fases de optimización y combina la inteligencia de búsqueda de gradiente, genética y de enjambre para una verdadera optimización multi-atributo, estructurada, e híbrida por búsqueda directa.

La novedad del enfoque CHDS propuesto se deriva del hecho de que, a diferencia de la mayoría de los otros autores que han combinado algoritmos basados en gradiente y sin gradiente (ejemplos relevantes son ¹¹⁻¹³), CHDS no cambia de un tipo de algoritmo a otro dependiendo de cómo avanza la optimización, sino que combina elementos de los diversos tipos de algoritmos en cada fase.

El objetivo de esta sección es mostrar que CHDS puede aplicarse con éxito a la optimización de la geometría de los HRSG, resultando en diseños con mejores prestaciones, competitividad de costes y, en algunos casos, diseños bastante diferentes de los convencionales.

Este trabajo se ha llevado a cabo para varias familias de HRSG de un fabricante en particular y, por lo tanto, algunos de los resultados no se pueden mostrar completamente por razones de confidencialidad.

La principal preocupación de la mayoría de los fabricantes de HRSG hoy en día es satisfacer los requisitos del cliente final, e incluso mejorarlos para superar a sus competidores, a la vez que se reduce el coste total de la unidad. El requisito principal para un HRSG moderno es mantener la caída de presión en toda la unidad por debajo de un umbral máximo permitido, mientras se recupera el máximo calor disponible de la corriente de gases. Una ventaja competitiva adicional y muy importante, como se ha mencionado anteriormente, es poder satisfacer los requisitos de rendimiento con unidades más pequeñas (principalmente reduciendo la longitud total).

La aplicación del algoritmo CHDS a este caso particular de optimización del diseño ha producido resultados muy interesantes. En primer lugar, la Figura 3 presenta los resultados de dos alterna-

tivas de diseño diferentes. Se observa que vale la pena aplicar un esquema de optimización, ya que hay importantes posibilidades de mejora al cambiar la geometría.

La primera alternativa de diseño es el diseño que se utilizó para la central eléctrica real, en el caso particular de una de las familias de HRSG estudiadas, y que está actualmente en funcionamiento (plano superior de ángulo único para el conducto de entrada). Éste es un diseño más tradicional. Por otra parte, la segunda alternativa de diseño tiene un plano superior de doble ángulo para el conducto de entrada, que es una característica de diseño que muchos fabricantes introdujeron hace años, porque se suponía que tenía siempre un rendimiento mejorado sobre el diseño de ángulo único (también se muestra en este trabajo que el diseño de ángulo doble no siempre es mejor que el de ángulo único).

Los resultados de rendimiento de ambas alternativas de diseño, en términos de caída de presión y uniformidad de velocidad se muestran en la Figura 4. Hay una considerable mejora en términos de caída de presión con el diseño alternativo, por lo que vale la pena explorar más puntos de diseño para encontrar diseños óptimos, algunos incluso con geometrías poco convencionales.

La aplicación de CHDS tiene una fase 0 o fase de exploración de diseño que, en este caso, tiene 120 puntos de diseño. Estos puntos pueden obtenerse mediante técnicas de DoE, tales como *Latin Hypercube*, u otros métodos especialmente recomendados, por ejemplo en ¹⁴, para problemas similares a éste. En el caso de este trabajo, se utilizó un esquema de DoE propio, basado en la experiencia de los autores, pero el hipercono latino y otros métodos también se probarán en trabajos futuros.

Una vez finalizada la fase de exploración, CHDS lleva a cabo la optimización en sí. Los resultados de una optimización de una fase para dos familias de HRSG se representan en la Figura 4.

Una de las representaciones más poderosas para entender los resultados de la simulación de un problema de optimización de múltiples atributos es el frente de Pareto. El frente de Pareto muestra la familia de soluciones óptimas teniendo en cuenta todos los objetivos considerados (en este caso, la caída de presión total a través del conducto de entrada y la no uniformidad de velocidad en el plano de salida del mismo). Todas las soluciones en el frente de Pareto son igualmente óptimas, ya que el óptimo absoluto sería tener caídas de presión y no uniformidades de velocidad tan cerca de cero como fuera posible, y por lo tanto cada una de las soluciones en el frente de Pareto son una combinación óptima de caída de presión y uniformidad de velocidad.

En términos generales, los diseños con un valor reducido para el primer ángulo de la pared superior y un valor elevado para el segundo ángulo reducen la caída de presión, porque el flujo está más restringido y no se puede separar tan fácilmente. Sin embargo, la uniformidad de velocidad es peor debido al segundo ángulo abrupto de la pared superior. Por el contrario, si se aumenta el primer ángulo y se reduce el segundo ángulo, se producirá separación de flujo en algún punto y, por lo tanto, se incrementará la caída de presión, pero se mejorará la uniformidad de velocidad. Análisis similares pueden realizarse con el resto de las variables de diseño.

Antes de analizar los resultados de la Figura 4 se presenta una breve validación de los resultados del programa de CFD utilizado (ANSYS v17.0) para la evaluación de los HRSG. La siguiente tabla presenta la comparación de las caídas de presión proporcionadas por el fabricante y las obtenidas de la simulación CFD para cada uno de los bancos de tubos que se encuentran a lo largo de un HRSG. Ésta es una comparación típica para validar cualquier simulación CFD aplicada a un HRSG. Para mayor claridad, los bancos de tubos se muestran, para un ejemplo de simulación, en la Figura 1.

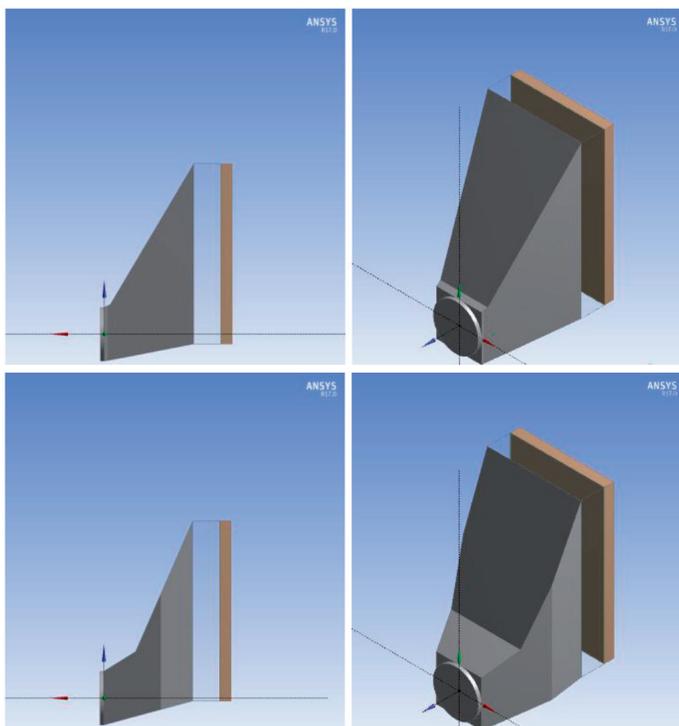


Fig. 3: Vistas laterales e isométricas de dos ejemplos de alternativas de diseño para el conducto de entrada de un HRSG (plano superior de ángulo único y plano superior de doble ángulo para el conducto de entrada). Éstos son el diseño actual real (arriba) y un diseño alternativo (abajo) para la primera familia de HRSG analizada

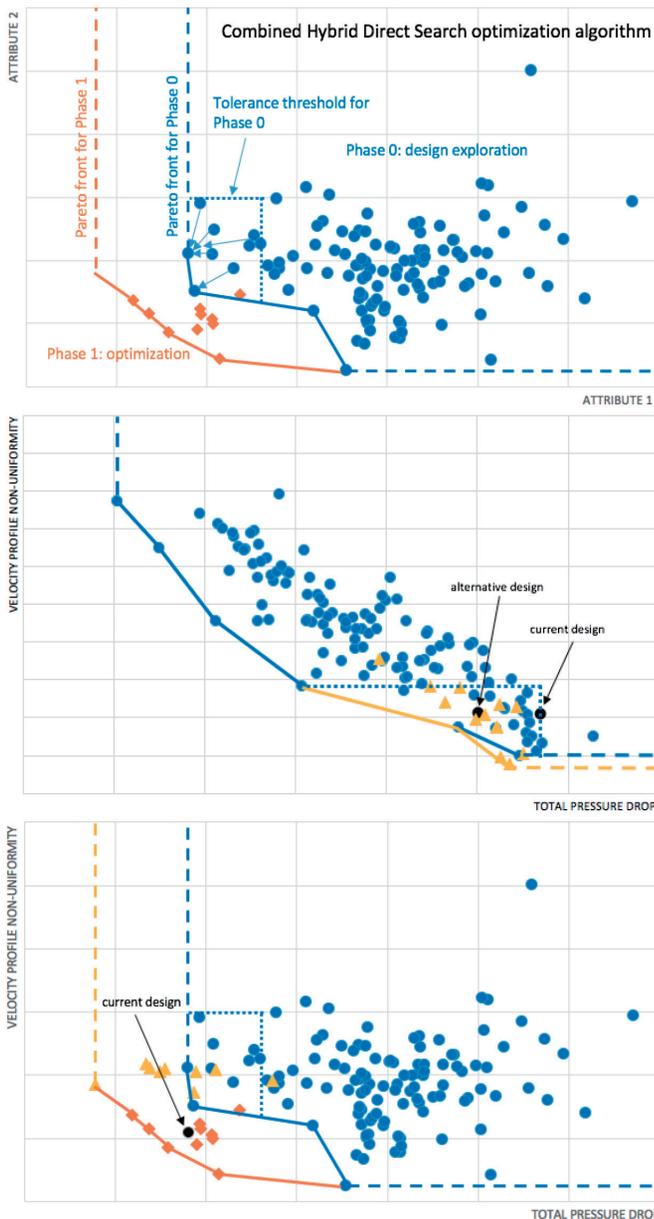


Fig. 4: Ilustración del procedimiento seguido por el algoritmo de optimización CHDS para una optimización de 1 fase (superior); Aplicación del algoritmo CHDS a la optimización de la forma del conducto de entrada de dos familias de HRSG (central e inferior). Se utilizan dos conjuntos de valores para los factores de incremento de las variables (como se explica en 1) para el proceso de cruzamiento: valores menores que 1 (puntos candidatos marcados con triángulos) y mayores que 1 (puntos candidatos marcados con diamantes)

Hay ciertos errores entre los valores proporcionados por el fabricante y los obtenidos de la simulación CFD. Estas diferencias se deben a la no uniformidad de la distribución de velocidades en la entrada de cada uno de los bancos de tubos (simulados como medios porosos), ya que las ecuaciones de los medios porosos asumen un perfil de velocidad homogéneo. Por otro lado, las caídas de presión proporcionadas son mediciones puntuales y sus valores se ven afectados por la posición exacta del sensor dentro del plano de entrada / salida de cada banco de tubos. En cualquier caso, los errores son muy aceptables, dada la aplicación y los valores de presión absoluta, lo que significa que los errores absolutos son de muy pocos Pascales.

Centrándose ahora en los resultados de la Figura 4, se puede observar cómo la aplicación del algoritmo CHDS ha producido una mejora sustancial de las prestaciones de los HRSG.

Aunque la fase 0 selecciona los puntos de diseño siguiendo un procedimiento que cubre el área de la región de búsqueda en la que

el diseñador está más interesado, esta fase en sí misma es una mera exploración de diseño y no una optimización como tal. La Fase I es la primera fase de optimización verdadera del algoritmo CHDS.

Cabe señalar, en cualquier caso, que el procedimiento de exploración de diseño incorporado al CHDS para llevar a cabo los análisis para la fase 0 ya es bastante bueno en muchos casos, ya que los puntos de diseño calculados producen buenos resultados y cubren una amplia área del espacio de los atributos. Por lo tanto, la fase 0 es en sí misma valiosa en el sentido de que los fabricantes no han realizado una exploración tan extensa de diferentes puntos de diseño, en la mayoría de los casos. Se puede ver que las tendencias de diseño actuales (es decir, usar un diseño de ángulo único o, alternativamente, considerar que un diseño de doble ángulo es siempre mejor) pueden ser engañosas o, al menos, no óptimas. Además, los diseños no convencionales y no intuitivos pueden superar a los diseños tradicionales.

Como ejemplo de esto, la Figura 5 y la Tabla 2 incluyen la comparación entre varios puntos de diseño representativos, de entre todos los simulados en la Figura 4.

En esta figura y tabla se puede observar cómo diseños muy similares (es decir, cercanos en el espacio de las variables) y que intuitivamente estarían muy cerca también en el espacio de los atributos (es decir, con unas prestaciones muy parecidas), pueden tener resultados bastante diferentes. Por otro lado, diseños muy diferentes pueden estar muy cerca en el espacio de atributos. Cabe destacar, en particular, que los diseños de ángulo doble no son necesariamente mejores que los diseños de ángulo único (por ejemplo, los puntos de diseño *d* y *g* están muy cerca en prestaciones). Esto significa que se requiere un análisis exhaustivo en cada caso, ya que las tendencias de diseño actuales pueden no ser siempre la mejor opción. Además, tanto la fase 0, como fase de exploración y, lo más importante, la fase I, pueden producir diseños no convencionales con mejores prestaciones (punto de diseño *i* y, especialmente, *j*).

Banco de tubos	Error [%]
#1	9
#2	9
#3	7
#4	3
#5	5
#6	1
#7	2
#8	4
#9	5
#10	5
#11	4
#12	4
#13	4
#14	4
#15	5
#16	5
#17	5
#18	5
#19	6
#20	8

Tabla 1: Error relativo entre las caídas de presión proporcionadas por el fabricante y las obtenidas del análisis CFD para los bancos de tubos de un HRSG usado como ejemplo

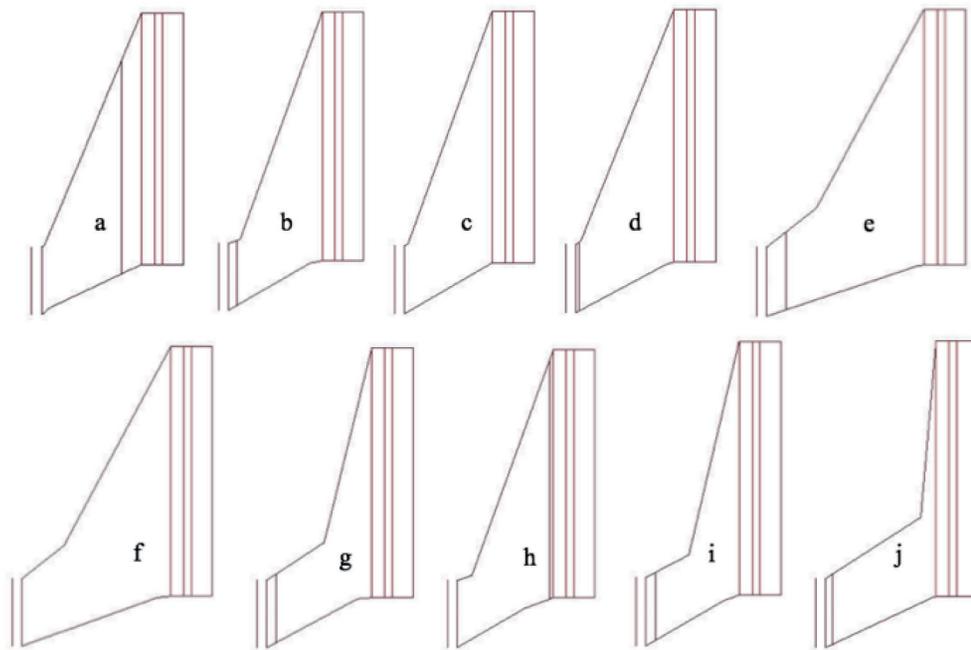


Fig. 4: Vista lateral de puntos de diseño de ejemplo que están muy cerca en el espacio de variables y también muy cerca en el espacio de atributos ("a" a "d"); muy cerca en el espacio de las variables y separados en el espacio de los atributos ("e" y "f"); bastante separados en el espacio de variables y muy cerca en el espacio de atributos ("g" y "h"); y puntos de diseño que son bastante poco convencionales (bastante disruptivos) y con unas prestaciones no intuitivas ("i" y, especialmente, "j")

Todos los resultados de la Figura 5 refuerzan la importancia de aplicar optimización, ya sea con CHDS u otros métodos, al problema del diseño del conducto de entrada de los HRSG.

En la Fase I, en su conjunto, los puntos de diseño mejoran los resultados de los puntos de diseño estudiados en la fase 0. Además, se puede observar cómo la aplicación de CHDS mejora el frente de Pareto obtenido en la fase 0. Las geometrías de los diseños óptimos obtenidos son, en algunos casos, bastante poco convencionales y no intuitivas, como se ve en la Figura 5. Todo esto ha permitido al fabricante tener un nuevo conjunto de directrices de diseño para sus diferentes familias de HRSG para los próximos años.

Además, el fabricante ha recibido frentes de Pareto, similares a los mostrados en la Figura 4, para cada una de sus principales

Diseño	Caída de p total	No uniformidad de v
a	72%	146%
b	72%	145%
c	72%	145%
d	75%	139%
e	98%	89%
f	96%	102%
g	71%	139%
h	73%	141%
i	64%	146%
j	60%	159%

Tabla II: Comparación entre diferentes diseños, para mostrar puntos de diseño que: están muy cerca en el espacio de variables y también muy cerca en el espacio de atributos ("a" a "d"); están muy cerca en el espacio de las variables y separados en el espacio de los atributos ("e" y "f"); están bastante separados en el espacio de variables y muy cerca en el espacio de atributos ("g" y "h"); y puntos de diseño que son bastante poco convencionales (bastante disruptivos) y con unas prestaciones no intuitivas ("i" y, especialmente, "j"). Todos los resultados son con respecto a los atributos del diseño actual de HRSG de la Figura 4 (medio)

familias de HRSG. Esto permite alcanzar un compromiso entre la caída de presión y la no uniformidad de velocidad, porque, para un tipo particular de HRSG, se pueden preferir puntos de diseño con menores caídas de presión totales, incluso a expensas de no uniformidades mayores, o viceversa. Las geometrías exactas obtenidas para los puntos óptimos de diseño no se pueden incluir en este documento por confidencialidad.

Para tener una mejor visión del verdadero potencial de CHDS para la optimización del diseño de geometrías, permitiendo grandes desplazamientos, el algoritmo se aplica a una segunda familia de HRSG, y se pueden observar resultados muy interesantes en la Figura 4 (abajo).

En particular, para este caso, la exploración de diseño realizada en la fase 0 (puntos candidatos marcados con círculos) abarca una amplia área de la región de

búsqueda, pero el diseño real existente, ya construido y en funcionamiento para esta familia HRSG particular, tiene mejores valores para ambos atributos que todos los demás candidatos. Esto significa que una mera exploración de diseño puede ser inadecuada o no suficientemente buena en algunos casos. Una vez que el CHDS calcula los puntos para la Fase I, las simulaciones muestran que los puntos candidatos mejoran considerablemente, no sólo frente a los puntos de la fase 0, sino, lo más importante, frente al diseño actual real de este HRSG.

Para este segundo ejemplo de HRSG, se ha realizado una prueba adicional. Los factores de incremento utilizados para obtener nuevos puntos de diseño candidatos para la Fase I a partir del cruzamiento de sus padres de la Fase 0 se modifican (los factores de incremento se explican en detalle en ¹). En particular, se utilizan dos conjuntos de valores: el primer conjunto (puntos candidatos marcados con triángulos) tiene factores menores que 1, lo que significa que el cruzamiento de las soluciones padre está entre ambos padres (en el espacio de las variables); el segundo conjunto (puntos candidatos marcados con diamantes) tiene factores mayores que 1, lo que significa que el cruzamiento de las soluciones de origen se encuentra más allá del punto de partida perteneciente al frente de Pareto (siempre se comprueba que los nuevos valores de las variables se encuentren dentro del rango de las mismas, según lo definido por el diseñador).

Para este caso, el uso de factores de incremento por encima de 1 produce mejores resultados, en general. Sin embargo, el mejor punto candidato en términos de caída de presión total se obtiene con un factor de incremento por debajo de 1. Por ello, CHDS explora automáticamente ambos conjuntos de valores, para tener una mayor probabilidad de alcanzar diseños óptimos.

Por último, para ilustrar mejor el rendimiento de los diseños óptimos, dos de los puntos de diseño en el frente de Pareto para cada familia de HRSG se presentan en la Figura 6. Se muestran los perfiles de velocidad a la salida del conducto de entrada, para representar el nivel de uniformidad logrado tras la optimización.

Debe tenerse en cuenta que, debido a las limitaciones de fabricación, coste y disposición de planta, comunes a los HRSG actuales, los diseños todavía tienen un nivel de desprendimiento de flujo y no uniformidad. A continuación, la uniformidad mejora a medida que los gases fluyen a través de los haces de tubos.

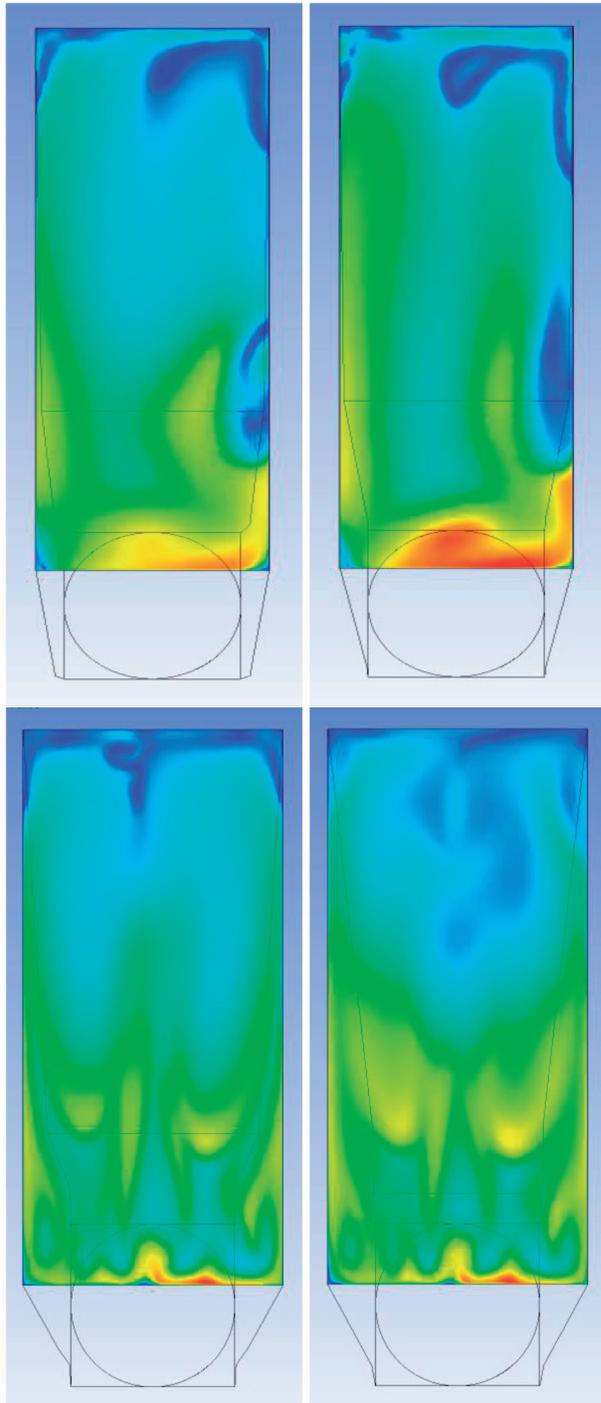


Fig. 6: Gráficos de contorno de velocidad para el plano de salida del conducto de entrada: contornos para los diseños recomendados, con uniformidad mejorada con respecto a los diseños actuales (izquierda); y para diseños con la peor uniformidad, pero dentro del frente de Pareto (derecha), para la primera familia HRSG (arriba) y para la segunda familia (abajo). Los valores de velocidad varían de 0 (azul) a 100 m/s (rojo) - la escala detallada no se puede incluir por razones de confidencialidad

[2] Ameri M, and Dorcheh FJ. "The CFD Modeling of Heat Recovery Steam Generator Inlet Duct". International Journal of Energy Engineering. 2013. Vol. 3-3. p74-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.5963/IJEE0303003>.

[3] Lee BE, Kwon SB, and Lee CS. "On the Effect of Swirl Flow of Gas Turbine Exhaust Gas in an Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator". ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2002. Vol. 124. p496-502.

[4] Galindo-García IF, Vázquez-Barragán AK, and Rossano-Román M. "CFD Simulations of Heat Recovery Steam Generators Including Tube Banks". Proceedings of the ASME 2014 Power Conference POWER2014, Baltimore, Maryland, USA, July 28-31. 2014.

[5] Aslam Bhutta MM, Hayat N, Bashir MH, et al. "CFD Applications in Various Heat Exchangers Design: A Review". Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 32. p1-12.

[6] Galindo-García IF, Vázquez-Barragán AK, and Rossano-Román M. "CFD Simulations of a Heat Recovery Steam Generator for the Aid of Power Plant Personnel". Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering and ASME 2012 Power Conference, Anaheim, California, USA, July 30-August 3. 2012.

[7] Shi X, Chriswindarto W, and Boyce D. "Application of CFD Modelling in HRSG Evase Design". Proceedings of the 2009 Power Conference, ASME, Albuquerque, New Mexico, USA, July 21-23. 2009.

[8] Hegde N, Han I, Lee TW, et al. "Flow and Heat Transfer in Heat Recovery Steam Generators". Journal of Energy Resources Technology. 2007. Vol. 129. p.232-242.

[9] Sundén B. "Computational Fluid Dynamics in Research and Design of Heat Exchangers". Heat Transfer Engineering. 2007. Vol. 28-11: p.898-910.

[10] Daiber J. "Fluid Dynamics of the HRSG Gas Side". Power Magazine, (<http://www.powermag.com/gas/534.html>). 2006.

[11] Guliashki 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.

[12] 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>.

[13] 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. p.433-454. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2001.6866>.

[14] 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, Serbia. 2007.

[15] 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. 2015. http://www.iit.upcomillas.es/publicaciones/mostrar_publicacion_working_paper.php.en?id=259.

[16] Paniagua J. "Aerodynamic Optimisation of the Nose Shape of a High-Speed Train". PhD diss. Technical University of Madrid. 2014.

[17] 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, E. Martín y J.M. Cáncer, de KeelWit Technology (ESPAÑA), por sus valiosas contribuciones, y a AMEC FOSTER WHEELER por su firme apoyo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Prada-Nogueira I, De Cuadra F, and Sánchez-Miralles A. "General Model for Automatic Design Optimisation of Aerodynamic Components. Wind Tunnel Case Study". DYNA, 92(4). 442-448 DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8144>.