

Feasibility of Rapid Prototyping Manufacturing of Multi-Probe for Measuring Total Pressures at High Temperatures

F. Calvo Narváez, MSc.¹, and C. Rodríguez Monroy, PhD.¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, España, felix.calvo@upm.es, crmonroy@etsii.upm.es

Abstract— The variation in total pressure along the turbine engine is essential both to determine its efficiency to understand its operation. Due to rising temperatures in the combustion chamber and turbine aircraft engines latest generation of the development of probes capable of withstanding the high temperatures of these is necessary. Designing a multiprobe by laser sintering is novel by reduced meter size, choosing its shape, and manufacturing it from a single piece. 7 sensors are placed on a given turbine at various radial and circumferential positions to find the flow pressure profile section in position. It has demonstrated the technical feasibility, as theoretically design meets the structural and heat transfer conditions, and thus has been validated as microstructural dimensional model. Considering the economic viability of the proposed alternative method of manufacture is not so obvious, if the costs of manufacturing processes are considered.

Keywords— Rapid prototyping, laser sintering, Multiprobe, aircraft engines, total pressures.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.166>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.166>

Viabilidad de la Fabricación por Prototipado Rápido de una Multisonda para la Medida de Presiones Totales a Altas Temperaturas

F. Calvo Narváez, MS¹, C. Rodríguez Monroy, PhD¹

¹Universidad Politécnica de Madrid, España, felix.calvo@upm.es, crmonroy@etsii.upm.es

Resumen- *La variación de la presión total a lo largo de la turbina de un motor resulta esencial tanto para determinar la eficiencia del mismo como para entender su funcionamiento. Debido al aumento de temperaturas en la cámara de combustión y turbina en los motores de avión de última generación se hace necesario el desarrollo de sondas capaces de resistir las elevadas temperaturas de éstos. El diseño de una multisonda por sinterizado láser resulta novedoso por la reducción en el tamaño del medidor, pudiendo elegir su forma, y fabricándolo de una sola pieza. Se colocan 7 sensores en una sección dada de la turbina en varias posiciones radiales y circunferenciales para hallar el perfil de presiones del flujo en esa posición. Se ha demostrado la viabilidad técnica, ya que el diseño cumple teóricamente las condiciones estructurales y de transmisión de calor, y se ha validado el modelo tanto dimensional como microestructuralmente. La viabilidad económica considerando la alternativa al método de fabricación propuesto no es tan evidente, si se consideran sólo los costes derivados de los procesos de fabricación.*

Palabras clave-- *Prototipado rápido, sinterizado láser, multisonda, motores de avión, presiones totales.*

I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones críticas en algunas etapas de los motores de las aeronaves modernas obligan a tener perfectamente documentado cada parámetro que influya en las mismas, de ahí la necesidad de medidores y sondas (en inglés denominados “rakes”) y de la instrumentación. El aumento de temperaturas en la cámara de combustión y en la turbina hace necesario desarrollar sondas que soporten estas elevadas temperaturas, y que en el futuro parece que seguirán incrementándose. Por ello es necesario medir parámetros fundamentales del motor, como es la presión total a altas temperaturas, con una mínima perturbación del medio y con una relación de peso y coste lo menor posible.

El diseño de una multisonda, aunque es laborioso, no conlleva ninguna novedad como para centrar el estudio completamente en ello. Se trata más bien de un caso singular con un novedoso o no tan habitual método de fabricación, que es el sinterizado láser, que es una técnica de prototipado rápido [1], también integrada en la fabricación aditiva [2]. Esto nos va a permitir no sólo la reducción del tamaño del medidor, lo que ahorrará material y rebajará también el peso y el coste, sino que nos dará la oportunidad de elegir su forma, y además fabricándolo de una sola pieza.

Los procesos aditivos de fabricación rápida se caracterizan por tener un mínimo número de operaciones intermedias entre el desarrollo de la idea por parte del

diseñador y la obtención del producto acabado; de hecho, el proceso está compuesto de los siguientes pasos: Desarrollo conceptual de la idea. Diseño del modelo en una aplicación de CAD 3D. Generación de un fichero *.stl para que el equipo de fabricación aditiva pueda leer la información modelada en CAD. Generación del código de Control Numérico por parte del equipo de fabricación aditiva. Fabricación del componente. Eliminación del material de soporte (en el caso de que la tecnología utilizase material de soporte y la pieza lo requiriese). Verificación final del producto.

Como se puede deducir, es el propio diseñador quien puede encargarse de la fabricación del producto, sin necesitar operarios o equipos de alta automatización que controlen las operaciones de cambio de utillajes y demás. Pero no todas estas operaciones son sencillas. En algunos casos, el fichero *.stl debe ser modificado por el usuario y el código CNC debe ser revisado antes de comenzar la fabricación; además de que, la forma de modelar en CAD estará condicionada por los requisitos del producto final.

Las técnicas de fabricación aditiva se distinguen principalmente de las técnicas convencionales por dos características que, además les confieren grandes ventajas competitivas en tanto en cuanto no encarecen el proceso de fabricación: La complejidad geométrica de la pieza a fabricar, y la personalización de la pieza. En el primer aspecto, la esbeltez, vaciados interiores, canales internos, espesores variables, formas irregulares, etc. son ejemplos de las geometrías que las técnicas de fabricación convencionales no logran reproducir o lo hacen mediante aproximaciones, ensamblajes o mediante procesos de muy alto coste; sin embargo, para las técnicas de fabricación aditiva, dichas geometrías no suponen grandes inconvenientes. En la segunda característica las técnicas de fabricación aditiva permiten fabricar productos exactamente iguales o completamente distintos sin influir notablemente en el proceso; de este modo, la personalización de la pieza a fabricar residirá en el fichero informático que se le suministre al equipo de fabricación aditiva. Esta personalización es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido, y su aplicación en masa es uno de los paradigmas que persigue la industria en países desarrollados y que se considera clave para su sostenibilidad.

El instrumento clave de la sonda de medida es el sensor, que tiene la función de convertir la variable física en una señal. Este tipo de señales tienen la propiedad de poder ser

manipuladas en un sistema de transmisión (eléctrico, mecánico, etc.) y de ahí al dispositivo en el que quedará registrada. Tanto los sensores como los transductores que se encargan de transmitir la señal han de ser calibrados, teniendo en cuenta las condiciones ambientales del medio en el que se realizan las medidas. Los principios básicos para el diseño de instrumentación deben ser tenidos en cuenta: el resultado de la medida debe ser una cantidad significativa, la medida debe realizarse con la mínima perturbación del medio, la mitigación de errores en la medida identificando todas las variables que influyen en la misma, la aplicación de la ingeniería concurrente con una rápida identificación y definición de los componentes a modificar.

La medida de la presión total es necesaria para la determinación de los campos de velocidades, evaluación de prestaciones y de pérdidas. La presión total se define como la presión obtenida mediante la deceleración isentrópica del flujo hasta el reposo. La interferencia del soporte de la sonda es despreciable cuando la longitud de ésta es de 2 o 3 veces su diámetro. El conocimiento preciso de la variación de la presión total a lo largo de la turbina de un motor resulta esencial tanto para determinar la eficiencia del motor como para entender su funcionamiento. Mediante la medición de la presión y temperatura en distintas secciones del motor se puede calcular la eficiencia de cada etapa del compresor, o bien de la turbina, como en nuestro caso. En la práctica esto se consigue montando sensores en varias posiciones radiales y circunferenciales en una sección determinada. Normalmente se suelen instalar un mínimo de 5 sensores en cada elemento, siendo en nuestro caso ese número de 7, con lo que será suficiente para obtener un perfil de presiones del flujo en la posición deseada. Los sensores se pueden instalar tanto en soportes desmontables como en componentes del motor.

II. MATERIALES

Los materiales que constituyentes de la sonda han de cumplir una serie de requisitos térmicos y estructurales debido a las características de la misma, por lo que la elección de los mismos es de vital importancia para el desarrollo del estudio: El cuerpo de la sonda será fabricado por sinterizado láser, lo que limita la elección de materiales al catálogo que oferta la empresa fabricante EOSINT. Además, las cabezas sensoras serán fabricadas por separado. Y, por último, para la unión entre las cabezas sensoras ("kiel heads") y el cuerpo de la sonda, utilizaremos un cemento cerámico.

A. *Cuerpo de la Multisonda*

La primera consideración es que partiremos de que el cuerpo será metálico para su fabricación mediante EOSINT M. La oferta de metales para el sinterizado láser resulta ser bastante amplia: desde aleaciones de titanio o cobalto-cromo, hasta aleaciones de acero o níquel. Todos estos materiales son pulverizados y homogeneizados y estudiados para la obtención de sus prestaciones en esta forma y este tipo de fabricación; el

uso de cualquier otro material quedaría fuera de nuestro estudio, siendo inviable su utilización ya que para el sinterizado láser no sólo se tiene en cuenta el material, sino que éste va intrínsecamente unido a su método de fabricación.

Ponderando las características que ofrece el catálogo de EOS, el material elegido será Inconel 718 [3], en su versión patentada para la fabricación por sinterizado láser EOS NickelAlloy IN718. Se caracteriza por su buena resistencia estructural, a la fatiga, a fluencia y a rotura a temperaturas de hasta 700 °C. Cabe explicar, que el uso de este material en una zona en la que las temperaturas rozan los 1000°C sería inviable de no ser por la refrigeración de la multisonda. Según describe el fabricante un material ideal para aplicaciones de alta temperatura, tales como partes de turbinas de gas, partes eléctricas y de instrumentación; aparte de un excelente potencial para aplicaciones criogénicas. Las características clave son: aleación con base níquel resistente al calor, excepcional resistencia a la corrosión, altas prestaciones mecánicas a temperaturas superiores a 700 °C.

Comparando el Inconel 718 en polvo con el material suministrado en barras habitual AMS 5662 se observa que el material en polvo para sinterizado presenta una mayor resistencia a tracción, mayor elongación y mayor límite de fluencia.

B. *Cabezas Sensoras*

En total contamos con 7 cabezas sensoras radialmente distribuidas a lo largo del cuerpo del rake. Estas tomas están expuestas al flujo de aire a 1200 °C. Para su fabricación se ha decidido elegir un material cerámico debido a su excelente comportamiento con estas altas temperaturas.

Debido a las necesidades de diseño, teniendo siempre en cuenta la experiencia anterior con este tipo de instrumentos de medida, se ha decidido que sean construidas en Degussit-AL23 (Al₂O₃) [4], que además de soportar las temperaturas extremas a las que puede estar expuesto (es capaz de resistir hasta 1950 °C), es un componente con unas características excepcionales frente a la corrosión. Además de sus propiedades físicas, se ha elegido Degussit porque ofrece una amplísima gama de tamaños y espesores. Se presenta en tubos de hasta 1.5 metros de longitud.

C. *Unión de Cabezas Sensoras al Cuerpo de la Sonda*

Para la unión se ha decidido utilizar un cemento cerámico. Tras estudiar distintas posibilidades, se ha optado por el uso del Sauereisen n°31, debido a sus excelentes características. Es un cemento porcelanoso de color blanco, usado comúnmente para ensamblajes, sellados, aislamientos y fijados de piezas cerámicas, de porcelana, metálicas y vítreas. Se adhiere a casi todas las superficies, previamente limpiadas de aceites y grasas. Es resistente a los aceites, la electricidad y los disolventes. Es conductor de calor y resistente a los repentinos cambios de temperatura. También resiste a todos los ácidos (menos al fluorhídrico). Es ignífugo y su máxima temperatura de trabajo es de 954 °C.

III. ARQUITECTURA DE LA MULTISONDA

A. Cabeza de la Multisonda

La construcción de las multisonda (llamada “rake” por su forma de rastrillo) dependerá de las limitaciones físicas, las condiciones de operación, los requerimientos de la medida y la capacidad de fabricación del suministrador. La cabeza del rake cumple dos funciones: situar y amarrar el rake y anclar los tubos conforme salen de él. Para los rakes más pequeños, por ejemplo, los de la salida del compresor de alta, la cabeza debe ser parte del cuerpo del rake. Los rakes más grandes pueden necesitar una placa adicional, atornillada a la cabeza del rake, para sujetar el tubo y las terminaciones. Cada rake tendrá su propio anclaje y terminaciones para adecuarse a cada tipo de instalación.

Las siguientes características son aplicables en todos los casos: El anclaje, que normalmente consiste en un saliente y una brida atornillada, debe posicionar y asegurar el rake, así como sellarlo contra pérdidas de fluido en el conducto o el annulus. El diseño del anclaje debe garantizar que el rake se coloque encarado hacia la corriente, y no se pueda instalar de una manera diferente a la diseñada. Los tornillos del anclaje deberán estar separados de los tubos y las terminaciones, confinados para evitar riesgo de daño producido por las herramientas de montaje. Los tornillos de los sub-ensamblajes no deben estar accesibles cuando el rake está colocado en el motor. Los tubos deben estar sellados adecuadamente en la zona de paso por la cabeza del rake para evitar pérdidas de fluido. Las terminaciones pueden estar en la cabeza del rake o separadas de él, dependiendo del tipo de aplicación. Las terminaciones deben estar adecuadamente soportadas y fijadas. Cada terminación debe ser identificada claramente con la identificación de un parámetro de instrumentación. La identificación del rake y los números de serie deben marcarse en la cabeza del rake, de tal manera que sean visibles cuando el rake se instala en el motor. La identificación de la posición circunferencial tiene que marcarse en la carcasa del motor, los rakes deben ser los mismos en todas las posiciones angulares. Las carcasas de los rakes deben ser capaces de admitir tanto rakes de presión como de temperatura, diseñados para un plano de medida.

B. Cuerpo de la Multisonda

En total contamos con siete cabezas. El método recomendado para la construcción de rakes en zonas calientes del motor es el de diseño con el perfil en “U”. El cuerpo del rake y las cabezas sensoras están normalmente fabricados de una pieza por electroerosión o métodos convencionales de mecanizado. La parte trasera del cuerpo del rake tiene una ranura para alojar los tubos de presión, y éstos se asegurarán mediante adhesivo cerámico. Después se soldará una chapa en la parte trasera para sellar la ranura. Si hay suficiente material, también se pueden perfilar los laterales del rake, siguiendo las consideraciones mecánicas. En los casos en los que los tubos llenen la ranura totalmente, se puede soldar una pequeña chapa

en la parte trasera del rake para evitar la pérdida de cemento. Para los rakes más grandes, como los diseñados para motores civiles grandes en la zona del fan, es preferible el método de rake fabricado, al ser más barato y ligero que el mecanizado a partir de un sólido. Para estas aplicaciones a baja temperatura, los tubos pueden fijarse con una resina de epoxi en la zona por donde salen del rake, para evitar el fallo del tubo debido a las vibraciones.

El cuerpo del rake se fabrica a partir de dos mitades, usando una plancha de material de un determinado grosor. Las cabezas sensoras tienen que ser mecanizadas de forma individual e instaladas, junto con los tubos de presión, en una mitad del rake. Las cabezas sensoras y los tubos deben ser soldados en su posición, y los tubos finalmente fijados con “shim clips” o soldados en la cara interna del rake. Después se suelda la otra mitad del rake. La cabeza y la cola del rake, generalmente mecanizadas, también deben ser soldadas en su posición, y después, la cavidad formada se rellenará mediante un agujero de ventilación producido en la cola del rake. Todos los rakes deben fijarse mediante tornillos en los puntos de anclaje instalados en la cabeza del rake y en la protuberancia de la carcasa del motor o “rig”. Se debe realizar el diseño del rake de forma que sólo pueda instalarse en una única posición, por ejemplo, colocando los agujeros de los tornillos en posiciones asimétricas. En algunas aplicaciones puede ser necesario amarrar la cola del rake en la pared interior del annulus. Se debe diseñar un perno en la cola del rake que deslice sobre un agujero en la pared del annulus. La presencia de un rake en un annulus pequeño o en un espacio entre vanos reduce el área de paso del flujo, lo que produce un incremento local de la velocidad. Por esta razón, los rakes deben diseñarse con las mínimas dimensiones posibles, manteniendo su integridad mecánica. Los cambios bruscos de sección se deben evitar, en especial en la zona de unión de la cabeza al cuerpo del rake, utilizando el mayor radio de acuerdo posible. El diseño debe ser tal que se minimicen las pérdidas de presión. Cuando se van a utilizar un número de rakes equiespaciados hay que considerar el orden de vibración del motor. En algunos casos puede ser necesario colocar extensímetros en el rake. Se debe prestar especial atención en el diseño si se considera que el rake va a estar sometido a grandes tensiones o a niveles de vibración que pudieran dañar el vehículo de ensayo.

C. Diseño de las Cabezas Sensoras

Las dimensiones de las cabezas sensoras están estandarizadas, tal y como aparecen en la Fig. 1, y de ellas hemos seleccionado las más pequeñas posibles, para ahorrar peso y reducir su tamaño. La longitud mínima del sensor (C) es de 6.5 mm y el diámetro exterior (B) es de 2.40 ± 0.12 . Se deben utilizar cuatro agujeros de sangrado, o preferiblemente dos, en dirección perpendicular al eje de la cabeza. Los agujeros de sangrado no deben posicionarse de tal manera que estén obstruidos por otras cabezas o el estator o el cuerpo de la sonda. Las cabezas sensoras deben alinearse con la dirección

del flujo, sin embargo, para facilitar la fabricación el rake puede diseñarse con la cabeza sensora inclinada respecto de la dirección media conocida del flujo. Se colocarán 3 sondas radialmente, distanciadas entre sí ángulos de 120°.

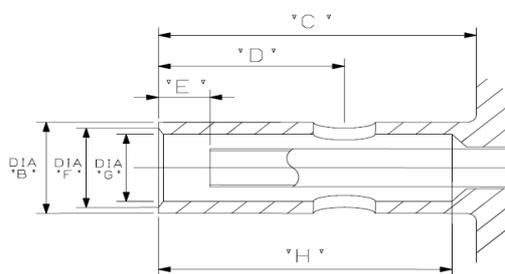


Fig. 1 Cabeza sensora.

D. Espaciado de la Cabezas Sensoras

El espaciado de los sensores a través del annulus o el conducto puede hacerse con una distribución definida por criterios aerodinámicos o mediante alguno de los métodos predeterminados para ello (nosotros hemos seleccionado el método de centro de áreas iguales). Con este método el área del annulus se divide en un número determinado de anillos concéntricos, con áreas iguales entre anillos. El sensor se coloca en la posición radial central de cada área. En la mayoría de las medidas se usa este método. Para el motor seleccionado, el radio interior del annulus es de 243,9 mm y el radio exterior es de 427,67 mm. La geometría de la superficie de un rake, que forma parte del perfil del *annulus*, debe ser de tal manera que minimice cualquier tipo de turbulencia en la capa límite que pudiera afectar a la cabeza del sensor más cercano. Esto se consigue mecanizando el rake para que se ajuste al *annulus*, o utilizando una arandela de ajuste debajo de la cabeza del rake para controlar la profundidad de la inmersión en el conducto.

E. Definición del Diseño

El diseño de cada rake puede variar para ajustarse a las diferentes aplicaciones, pero deben ser especificados los siguientes requerimientos de diseño.

Los estándares del fabricante del motor aplicables para soldadura, doblado, tratamientos térmicos, remachado, detección de roturas, ensayos de presión, etc.

La textura de la superficie tiene que cumplir con los requerimientos de diseño (por ejemplo, superficies de álabes, áreas sometidas a tensión, caras sellantes, etc.). El método de mecanizado por electroerosión está usándose cada vez más para realizar las cabezas carenadas, agujeros para tubos, ranuras y pequeños agujeros. La superficie resultante puede crear zonas de grietas y causar mermas en la calidad de la soldadura si no se elimina.

Se deben especificar todas las dimensiones esenciales, como pueden ser el espaciado radial de las cabezas sensoras y la altura porcentual del annulus. Si el instrumento no cumple con los estándares de la Figura 1, entonces se debe instruir un

test aerodinámico en las definición del diseño, de acuerdo con los especialistas de estas medidas.

Los ensayos especificados de esta manera se llevarán a cabo en cada instrumento individualmente, al fabricarse y con cada retrabajo: Las dimensiones que indican la posición del sensor serán expresadas en condiciones de frío, o también “en caliente” si aplica. El annulus o conducto en el plano de medida. La presión y temperatura en el ambiente donde va a trabajar el rake. Alertar sobre la necesidad de empaquetar el rake cuando no está instalado en el vehículo de ensayo. El método normal de indicar este requerimiento es colocar una etiqueta con la siguiente nota: “Este es un componente de mucho valor, se debe manipular, procesar y almacenar con cuidado”. Requerimientos sobre el par de apriete. Componentes para actuar como tapa en caso que los rakes no estén instalados en el vehículo de ensayo. Requerimientos relativos a enrasamiento de la cabeza del rake con el annulus, evaluando el escalón mínimo permitido.

IV. DISEÑO CAD

El diseño de un elemento consta de diferentes fases: Adquisición de datos del entorno. Recopilación de normativa y procedimientos a seguir. Cálculo de elementos geométricos que lo componen, etc. Una vez que todo esto se ha realizado y que somos capaces de comprender qué vamos a diseñar y por qué, llega el momento de plasmarlo de manera visual: mediante el diseño en CAD.

Si éste es un proceso importante en todo diseño, podemos afirmar que en nuestro caso concreto lo es aún más si cabe; la posibilidad que nos da el sinterizado láser, con la tecnología EOSINT S [5], de fabricar cualquier forma que se nos ocurra, limitándola sólo las características constructivas y de su entorno, nos da un sinfín de posibilidades. Hasta llegar al modelo final, se han pasado por infinidad de diseños que, o bien por motivos térmicos, estructurales o simplemente estéticos, se han ido modificando o directamente desechando. Hay que reseñar, que se trata de un proceso iterativo e intrínsecamente relacionado con los cálculos térmicos y estructurales, y todos se han ido realizando en paralelo hasta llegar a un punto común.

Trataremos sobre el cuerpo de la multisonda, dejando a un lado las cabezas sensoras que han sido diseñadas a parte sin ninguna dificultad añadida.

Preceptos preliminares: Todos los cálculos están orientados a la consecución del tamaño mínimo, para una mínima invasión en el motor. El diseño de la cabeza está predeterminado, pues en la zona de la turbina donde va instalado (Turbine Exhaust Case, TEC) existen unos tachones (“bosses”) que reutilizaremos para la instalación del mismo (ahorrando tiempo y menor interferencia en la carcasa, pues si necesitásemos realizar nuevos agujeros para posicionar el rake serían más horas de trabajo e intromisión en el desarrollo del motor). El detalle de un boss aparece en la Figura 2.

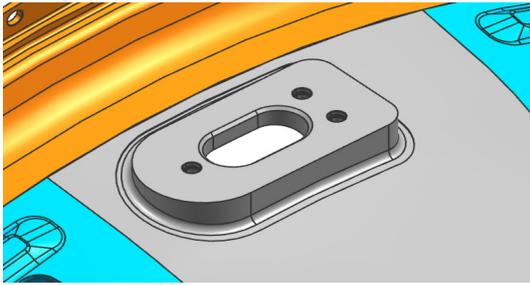


Fig. 2 Detalle de un "boss".

La longitud del cuerpo será de 178 mm, cubriendo toda la distancia interna del TEC, con la salvedad de una pequeña distancia necesaria para absorber las posibles dilataciones térmicas.

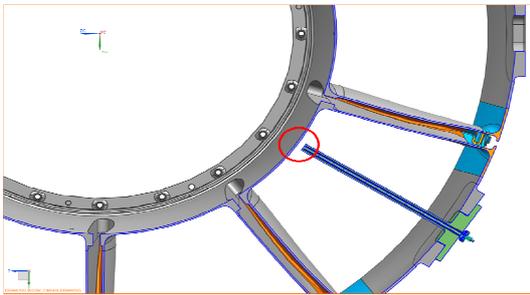


Fig. 3 Disposición de las multisondas.

Las cabezas sensoras van distribuidas a lo largo del cuerpo, según el método de áreas iguales. Ver Figura 3.

En un principio se orientaron todos los cálculos para un espesor mínimo de 0.4 mm pero tras un estudio más detenido, decidimos ser más conservativos y aumentarlo hasta 0.8 mm. No podíamos permitirnos la posibilidad de un escape del fluido refrigerante hacia una toma de presión o la interferencia entre dos tomas colindantes. Al ser el sinterizado láser un método de fabricación aún en desarrollo, se dan contratiempos como éste.

Tras estudiar las distintas configuraciones exteriores que se podrían aplicar al cuerpo, en un primer momento se barajó la posibilidad de que este fuese cilíndrico, pero se decidió mantener la recomendación para la construcción de rakes en zonas calientes del motor: perfil con forma de "U", reduciendo al mínimo sus dimensiones (con un diámetro exterior de 9.9 mm y una longitud de 13.6 mm). Se trata de un cuerpo esbelto con una relación de longitud/ancho = 13. En el apartado estructural, se determinó la necesidad de colocar un *pin* para unirlo a la carcasa interna del TEC, debido a su esbeltez. El cuerpo tiene una serie de alojamientos donde irán posicionadas las cabezas carenadas. Están diseñados para que las mismas tengan el ángulo indicado para que la vena de aire incida axialmente al conducto de presión.

Se ha considerado cuál debía ser la disposición de los conductos de presión para una mayor optimización del

espacio, obteniendo un trazado del conducto lo más directo posible (no existiendo interferencias entre ellos y con los conductos de refrigeración y siempre manteniendo los 0.8 mm de espesor). Ver Figura 4.

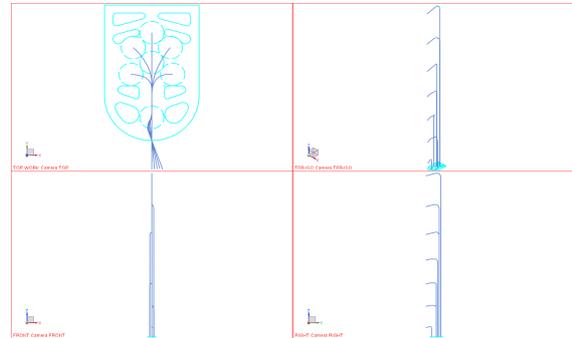


Fig. 4 Visualización de las tomas de presión en varias perspectivas.

Todo el diseño se ha ido desarrollando siempre en la premisa de la necesidad de la refrigeración. Los conductos han sido colocados exteriormente con la intención de evacuar la mayor cantidad de calor posible, pues esa será la zona donde la corriente incida directamente a 1200 °C. Más externamente, se encuentran los cuatro conductos de entrada, ya que llevarán el agua a menor temperatura, estando los conductos de retorno del refrigerante hacia el interior (cumpliendo la función de seguir refrigerando, pero en la zona de menor criticidad de temperaturas). Para la distribución del agua por el interior de la sonda se ha elegido el método "common rail", que consiste en una toma de agua que distribuye el agua por los cuatro conductos, existiendo un método de entrada y otro de salida. El sistema se completa conectando cada uno de ellos a uno de los lados de la bomba (entrada y salida), mediante un conector del tipo Gyrolok, que es muy estanco y que, gracias a su configuración, evita sobrecargas en la tubería permitiendo reinstalaciones, maximiza el flujo minimizando las pérdidas de presión y alberga una muy buena resistencia a la corrosión y al ataque del medio. Este tipo de conector también será usado para la conexión de los tubos de presión. Ver Figura 5.

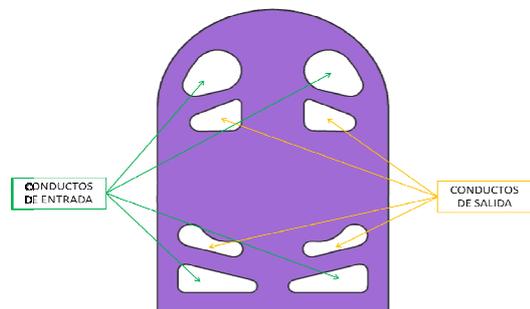


Fig. 5 Sección transversal de la sonda, con conductos de refrigeración.

V. FABRICACIÓN Y COSTES

Identificar y saber prever los costes derivados del diseño y fabricación de un modelo resulta un paso muy importante para la visualización de la viabilidad del mismo. Este diseño cuenta con costes de diversa índole: costes de fabricación, que comprende los costes de materiales y de proveedores y fabricantes; costes de montaje; costes de ingeniería; y costes derivados (inspección y validación de la pieza).

Los costes de fabricación se entiende que son los correspondientes a la obtención por sinterizado láser (SLS) del cuerpo de la multisonda. Se ha pedido presupuesto al fabricante para 3 multisondas, ya que los equipos necesarios resultan excesivamente costosos para una serie tan corta de multisondas, y que irán radialmente distribuidas en la sección. El plazo de suministro del material es nulo y el de fabricación corresponde a 8 semanas. El sinterizado de los 3 rakes se realiza en una sola hornada. Ver Tabla I

TABLA I
COSTES DE FABRICACIÓN DE LA MULTISONDA

Concepto	Coste Unitario (€)	Cantidad	Subtotal
Material Sinterizado	3900	3	11700
Hornada	2400	1	2400
Mano de Obra (h)	40	24	960
Total			15060

Los costes de fabricación para las cabezas sensoras se componen del coste de las cabezas carenadas, del tratamiento y de la mano de obra. Ver Tabla II.

TABLA II
COSTES DE FABRICACIÓN DE LAS CABEZAS SENSORAS

Concepto	Coste Unitario (€)	Cantidad	Subtotal
Cabezas Carenadas	250	21	5250
Tratamiento	300	1	300
Mano de Obra (h)	40	21	840
Total			6390

Los costes del montaje serán los derivados del pegado de las cabezas sensoras al cuerpo de la multisonda. Ver Tabla III.

TABLA III
COSTES DE MONTAJE

Concepto	Coste Unitario (€)	Cantidad	Subtotal
Degussit	140	1	140
Mano de Obra (h)	30	12	360
Total			500

Además están los costes de ingeniería que se deben a diseño, cálculo térmico, cálculo estructural, investigación, implementación y verificación, amortización informática y gestión administrativa, que se estima en un total de 20340 €. Entendemos por amortización informática la que genera el uso de los equipos informáticos (ordenadores, impresoras, discos duros, etc.), además de las licencias de software necesarias para el desarrollo de los distintos cálculos (NX-7.5, Pro/Engineer Mechanical,...). El coste total del conjunto se valora a 15000€/trienio, de ahí el coste unitario de 5000 €

(tomando la unidad como un año). Al haber tardado unos 6 meses en el desarrollo del diseño, la cantidad será de 0.5 años.

Los costes derivados se refieren al estudio posterior a la fabricación de la multisonda, y se deben a la inspección visual del modelo, a ensayos no destructivos por radiografía y ultrasonidos, ensayos destructivos y realización de macrografías de zonas problemáticas. El coste de validación e inspección se estima en 710 €.

El coste total se obtendrá sumando todas los conceptos mencionados para la ejecución de este proyecto, que es de 43000 €.

VI. VIABILIDAD

La viabilidad se va a analizar desde la doble vertiente técnica, y económica.

Desde el punto de vista técnico, el diseño cumple todos los requisitos técnicos para su orientación a ser fabricado. El estudio realizado demostró que se trata de un diseño apto desde el punto de vista estructural y de transmisión de calor.

Por tanto, podemos afirmar que su fabricabilidad desde el punto de vista teórico es factible, aunque, si bien es cierto, nos quedaría la parte práctica, la fabricación propiamente dicha. Es aquí cuando entra en juego el sistema de sinterizado láser, y cabe preguntarse: ¿será este capaz de cumplir con los objetivos prefijados?. Se trata de un tipo de piezas de una extremada precisión y, aunque el fabricante asegure ciertos valores de tolerancia, es un sistema prácticamente experimental, por lo que se hará totalmente necesaria la validación de la pieza, que consiste en estudiar a posteriori la calidad del método realizando un conjunto de pruebas invasivas a una probeta. Ésta será la única manera de cerciorarnos de que la pieza cumple con los objetivos y nos servirá de orientación para estimar los errores asumibles.

A. Validación de la Pieza Fabricada

El polvo utilizado para la fabricación del modelo que utilizaremos para la validación y el de las piezas de producción deben ser del mismo proveedor, mismo lote y contar con las mismas características (composición química, distribución de tamaño, morfología y calidad). Estos requisitos se garantizarán a través de un certificado de conformidad emitido para cada lote. En el caso de que alguno de estos preceptos cambiase, se hará un nuevo modelo de validación y no se continuará con la fabricación hasta que la inspección del mismo demuestre cumplir con los requisitos especificados.

También se realizará la validación dimensional y microestructural del modelo. Para ello, será necesaria la hoja de requerimientos del producto que deberá contener todos los parámetros y las estrategias de construcción que tienen que fijarse para garantizar la repetibilidad. También incluirán una referencia al polvo utilizado que permite trazabilidad de los requisitos especificados en el apartado anterior.

El modelo seguirá el mismo proceso de fabricación que las piezas de producción, incluyendo la limpieza y operaciones de fundición, tratamiento térmico, las inspecciones de ensayos

no destructivos y pruebas de fugas, excepto que no hay ninguna operación de mecanizado posterior. Se realizarán macrografías, técnica que permite observar las discontinuidades o defectos en los materiales con la ayuda del microscopio. Será necesaria la realización de un protocolo de cortes por las secciones más representativas (aquellas que contengan trazados problemáticos).

Para la validación, se realizarán secciones en todos aquellos puntos de la multisonda que necesiten una tolerancia dimensional afinada (encastre de las tomas de presión, finales de tubo, etc.).

Las secciones realizadas se utilizarán para analizar la microestructura del material sirviéndonos de la macrografía. Los defectos encontrados en cada una de las secciones se inspeccionarán con un aumento X50. Para el contorno de superficies o pequeños detalles se utilizará un aumento de X200.

Los requisitos de aceptación de defectos comprenden: Densidad superior al 99.91% (ver Figura 6). Grietas, corrosión intergranular, picaduras y corrosión resultan inaceptables. Defectos debidos a falta de linealidad, aceptable hasta 0.05 mm o 5% del espesor más pequeño, siempre que se encuentre a una distancia de la superficie mayor a dos veces su tamaño (ver Figura 7). Defectos debidos a la falta de linealidad de la fusión (ver Figura 8) y poros, aceptable hasta 0.1 mm en la dimensión máxima o 10% del espesor, siempre que se encuentre a una distancia de la superficie de más de dos veces su dimensión máxima, y el requisito de distancia a la superficie no aplica si se puede corregir con un mecanizado posterior. (Además, los pequeños defectos son aceptables hasta el tamaño máximo. Distancia mínima entre defectos o entre grupos: cinco veces más grande que el tamaño del defecto más pequeño).

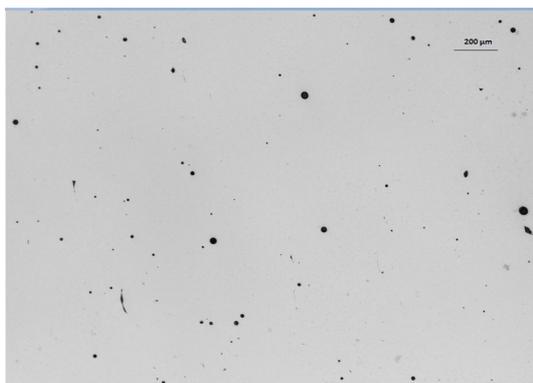


Fig. 6 Detalle de la densidad conseguida mediante SLS- X100 (99.62%, Inaceptable).

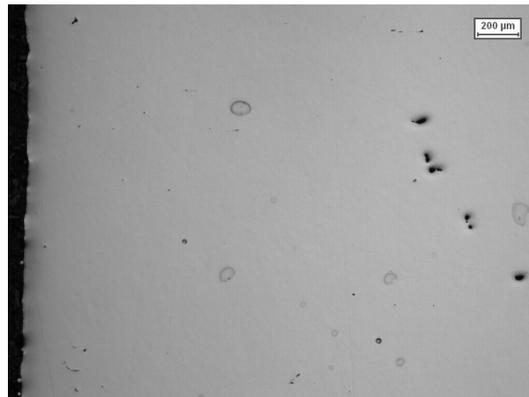


Fig. 7 Defecto por falta de linealidad (Inaceptable).

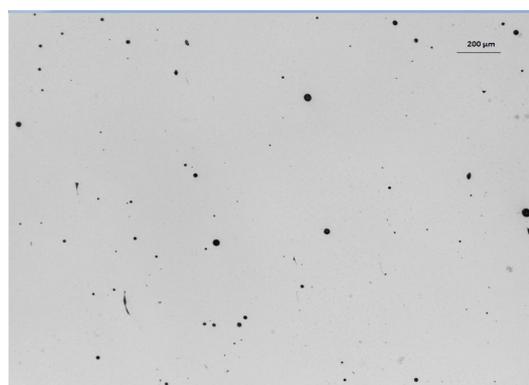


Fig. 8 Defecto por falta de fusión (Inaceptable).

Una vez realizada la validación, quedará definida la viabilidad de fabricación del diseño para la multisonda.

B. Viabilidad Económica

Una vez se calculó el coste total de la multisonda, centraremos el estudio de viabilidad en la comparación de costes entre el método de fabricación de nuestra sonda y los métodos tradicionales.

El proceso de fabricación de multisondas más común es el mecanizado. Será éste el método con el que realizaremos la comparación. Para ello, sólo tendremos en cuenta los costes de fabricación, aunque sí repercutirá la elección de método de fabricación en los costes de las demás disciplinas, la diferencia sustancial que hará viable o inviable la fabricación se centra en los costes derivados del procedimiento de fabricación.

El proceso de mecanizado de las 3 multisondas se compone de tres conceptos: gasto de las herramientas empleadas en el mecanizado (incluye la amortización de equipos y herramientas), materia prima y mano de obra, resultando cada uno de ellos en la cantidad de: 7880, 1200 y 3120 €, respectivamente. El coste total del mecanizado es de 12200 €. El plazo de suministro y fabricación es de 14 semanas.

Comparando el proceso de sinterizado láser con el de mecanizado resulta que el coste de fabricación por sinterizado sin las cabezas sensoras es de 15060 €, el coste de fabricación por sinterizado incluyendo las cabezas sensoras es de 21450 €, frente a un coste de fabricación por mecanizado de 12200 €. Desde este punto de vista, el mecanizado resulta más económico. Las cabezas sensoras elevan sustancialmente el precio de la sonda. Una solución de compromiso para hacer viable la utilización del sinterizado láser sería buscar una alternativa de fabricación para éstas.

No obstante, también debemos considerar el plazo de entrega, en cuyo caso, el sinterizado resulta más ventajoso (puesto que reducimos un 33 % del tiempo de espera). Los ahorros de tiempos, unido a los diseños más complejos de las piezas, representan una gran oportunidad.

Por otra parte, el mecanizado oferta una mayor gama de materiales (el sinterizado está aún en proceso de investigación y, poco a poco va aumentando su catálogo). Con respecto a los materiales, el sinterizado emplea materiales más complejos.

VII. CONCLUSIONES

Hemos de considerar las notables ventajas en el modelo sinterizado láser frente al modelo mecanizado: Libertad en la elección de la geometría (el mecanizado presenta muchas limitaciones en este aspecto, como el acceso de la herramienta, la necesidad de apertura trasera para la colocación de los tubos de presión, que no están integrados en el modelo, etc.). En cuanto a la pérdida de material, el mecanizado no es una técnica aditiva y el material sobrante es desechado. La operación de mecanizado es capaz de conseguir muy buenas tolerancias, pero no tiene buena repetitividad.

De la comparativa con otro método, llegamos a la conclusión de que sabiendo que se trata de un sistema de fabricación en proceso de desarrollo y que, aún así, los costes no son muy superiores a los de los métodos tradicionales, estamos en disposición de afirmar que el método de fabricación por sinterizado láser es lo suficientemente maduro como para resultar no sólo factible desde el punto de vista industrial, sino viable en términos económicos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la innovación que supone el uso de este método de fabricación SLS en la producción de multisondas. Ésto nos permitirá no solo la reducción de tamaño, lo que conlleva un ahorro de material y, con ello, de peso y coste de nuestro medidor, sino que nos dará la oportunidad de elegir una forma tan caprichosa como se nos antoje y, todo esto, fabricándolo de una sola pieza.

Por otro lado, hay una serie de ventajas asociadas a los métodos de fabricación aditiva muy interesantes desde el punto de vista de la producción de componentes, como son: Reducción del “time to market” de nuevos diseños, gracias al reducido número de operaciones que presentan los métodos de fabricación aditiva, estas técnicas permiten reducir los errores de comunicación entre los distintos participantes de un nuevo diseño y acelerar su salida al mercado, así como reducir el

riesgo de fracaso. Cuando la fabricación aditiva se utiliza como técnica de fabricación del producto final, y no sólo en el proceso de prototipado, muchas de las fases actuales de lanzamiento y validación pueden ser drásticamente reducidas; además de aportar una gran flexibilidad ante los continuos cambios de la demanda del mercado. Las series cortas de producción, en relación a la personalización ya descrita, conducen a que los lotes de producción pueden ser mínimos, llegando incluso a la unidad, sin influir apenas en los costes de fabricación, siempre y cuando no se considere la amortización del equipo. Esto se debe entre otros motivos a la falta de necesidad de utillaje, lo que supone una notable ventaja respecto de los métodos convencionales de fabricación.

También la reducción de errores de montaje y sus costes asociados, pues las técnicas de fabricación aditiva permiten, en algunos casos, obtener componentes ensamblados; de este modo, en el caso de hablar de una cadena de producción, la única operación posterior a la fabricación sería la inspección.

Además está la reducción de los costes de inversión en utillaje al no ser necesario. Por último, la necesidad de combinar procesos de fabricación aditiva SLS con procesos de mecanizado se muestra muy conveniente para lograr la calidad superficial requerida en cada lugar.

REFERENCIAS

- [1] S. Hoon, C. Baek, S. Lee, and I. Shup, “Anisotropic tensile failure model of Rapid Prototyping Parts – Fused Deposition Modeling (FDM)”, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, Nos.8 & 9, pp. 1510-1516. 2003
- [2] Fundación Cotec, “Fabricación Aditiva”. ISBN: 0-87170-703-9.2001.
- [3] EOS GmbH - Electro Optical Systems, Material Data Sheet. INCONEL 718, IN718.pdf, November 2013.
- [4] <http://www.degussit.co.uk>, December 2014.
- [5] <http://www.eos.info.org>. EOSINT S 750, March 2013.