



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá
Chile

Acosta Rojas, Jairo Andrés; Duque Daza, Carlos Alberto; Galeano Urueña, Carlos Humberto; Mantilla González, Juan Miguel

Digitalización 3d del rodete de un compresor centrífugo: un procedimiento alternativo

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 15, núm. 3, diciembre-agosto, 2007, pp. 236-244

Universidad de Tarapacá
Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77215304>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

DIGITALIZACIÓN 3D DEL RODETE DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO: UN PROCEDIMIENTO ALTERNATIVO

3D-DIGITIZING OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR'S IMPELLER: AN ALTERNATIVE PROCEDURE

Jairo Andrés Acosta Rojas¹ Carlos Alberto Duque Daza²
Carlos Humberto Galeano Urueña³ Juan Miguel Mantilla González⁴

Recibido 28 de marzo de 2007, aceptado 30 de agosto de 2007
Received: March 28, 2007 Accepted: August 30, 2007

RESUMEN

En la digitalización 3D del rodete del compresor centrífugo de un turbo cargador HT3B, se evaluaron numerosas metodologías que permitieran reproducir su geometría satisfactoriamente, de modo que a partir del modelo virtual obtenido se pudiera llevar a cabo una simulación computacional de flujo en el compresor centrífugo. Tras analizar dichas metodologías se decidió que la toma de tomografías axiales computarizadas era la más indicada, a pesar de que requirió previamente la construcción de un modelo en acrílico del rodete. Una vez se contó con las tomografías axiales computarizadas del rodete, se procedió a construir el modelo virtual del mismo usando un programa CAD 3D, integrando una metodología analítica para la generación de la geometría de los álabes del rodete de un compresor centrífugo, con la información metroológica adquirida a través de las tomografías. El modelo virtual del rodete presentó características aptas para el posterior trabajo de simulación, demostrando que el procedimiento planteado constituye una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de alta complejidad.

Palabras clave: Compresores centrífugos, digitalización tridimensional, tomografía axial computarizada, ingeniería inversa.

ABSTRACT

In the 3D digitizing of an HT3B turbocharger's centrifugal compressor's impeller, several methodologies were evaluated, reproducing its shape in such a way, that the obtained virtual model could be used to perform a computational flow simulation in the whole centrifugal compressor. After analyzing these methodologies, computerized axial tomographies were chosen as the most suitable methodology, despite requiring the previous construction of an impeller's acrylic-made model. Once the impeller's computerized axial tomographies had been taken, the generation of the virtual model was performed by software CAD 3D, by integrating an analytic methodology for the impeller's vanes' geometrical shape generation, with the metrological information extracted from the tomographies. The virtual model generated presented characteristics which made it appropriate for the intended flow simulation, showing that the procedure used for this purpose constitutes a feasible alternative for the 3D digitizing of complex mechanical parts.

Keywords: Centrifugal compressor, 3D digitizing, computerized axial tomography, reverse engineering.

INTRODUCCIÓN

Como parte del proyecto de investigación “Formulación y evaluación de un sistema alterno de generación local de energía a partir de microturbinas”, planteado y desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, se realizaron procesos de caracterización de turbomaquinaria de “pequeña escala”, como en compresores centrífugos,

entre otros elementos de esta clase. El trabajo presentado en este texto hace parte de una serie de dos artículos en donde se consignan algunos de los resultados obtenidos durante una primera fase de este proyecto. En este primero, se describe y presenta la metodología utilizada para la construcción del modelo CAD 3D del rodete de un compresor centrífugo de un turbo cargador HOLSET HT3B, utilizando una metodología de ingeniería inversa.

¹ Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Kr. 30 # 45-03. Edif. 453 Of. 401. Bogotá, Colombia. E-mail: jaacostaro@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Kr. 30 # 45-03. 453-401. Bogotá, Colombia. E-mail: caduqued@unal.edu.co. Autor correspondiente.

³ Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Kr. 30 # 45-03. Edif. 453 Of. 401. Bogotá, Colombia. E-mail: chgaleanou@unal.edu.co

⁴ Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Kr. 30 # 45-03. Edif. 453 Of. 401. Bogotá, Colombia. E-mail: jmmantillag@unal.edu.co

En un segundo artículo se presenta el modelamiento tridimensional del flujo en este mismo equipo utilizando un programa comercial de CFD, así como los resultados obtenidos en la simulación realizada.

Los procesos de diseño de partes empleando el concepto ingeniería inversa han logrado en los últimos años abrirse campo en medio de los procesos convencionales de diseño. La ingeniería inversa permite digitalizar, analizar, modificar y fabricar productos basados en objetos existentes [1-4].

El primer paso en un proceso de ingeniería inversa consiste en la digitalización del elemento, para luego realizar una reconstrucción del modelo tridimensional, empleando un software CAD 3D. Existen diferentes técnicas de digitalización de una pieza, las cuales se pueden dividir en dos grupos generales: las técnicas de contacto y las técnicas de no-contacto. Una clasificación un poco más detallada se relaciona con la metodología empleada para la digitalización de la pieza. De acuerdo con esta clasificación existen tres tipos de técnicas: el palpado (*tracking*), la reconstrucción por imágenes (*imaging*) y la técnica de detección de rango (*range finding*).

La digitalización por palpado o *tracking*, consiste normalmente en la localización tridimensional de las coordenadas de un conjunto de puntos ubicados en la superficie de la pieza. Dicho conjunto normalmente se denomina nube de puntos. Para la localización de estos puntos es muy frecuente el uso de máquinas de medición computarizada (CMM, computer measurement machine), como en [5-8]. El empleo de esta técnica implica varias limitantes, la primera es la baja velocidad de digitalización, la segunda es la imposibilidad de palpar interiores o piezas de geometría compleja, en tanto que la tercera se relaciona con la restricción para digitalizar cuerpos blandos o frágiles.

Un problema adicional asociado a las nubes de puntos obtenidas con las técnicas de palpado radica en los procedimientos, computacionalmente costosos, necesarios para lograr los ajustes de las superficies necesarias en la reconstrucción del modelo 3D. A este respecto, algunos trabajos como los reportados en [9, 10] han logrado desarrollar metodologías innovadoras que superan la necesidad de procesar numéricamente estas nubes de puntos.

El segundo grupo de técnicas, denominado reconstrucción por imágenes, emplea diferentes formas de procesamiento de imagen para obtener la información necesaria para la

reconstrucción del modelo 3D. Se distinguen dos formas principales: la reconstrucción con imágenes de superficie y la reconstrucción con imágenes por capas. En el primer método se emplean imágenes del objeto obtenidas desde diferentes ángulos (imágenes estereoscópicas) para reunir toda la información exterior de la pieza, tal como se describe en [11-13]. Un software especializado se encarga de convertir esta información en una representación sólida. Se observa cómo nuevamente el método se limita al copiado exterior de objetos, sin posibilidad de capturar los detalles internos o superficiales ocultos, como por ejemplo las caras de succión en un rodamiento de un compresor centrífugo.

La reconstrucción con imágenes por medio de capas busca solucionar el problema de la captura de las características geométricas internas de una pieza, así como detalles externos que se pierden con el empleo de otras técnicas. Las imágenes pueden ser capturadas, por ejemplo, por medio de fotografía CCD (*Charge Coupled Device*), cortando la pieza en secciones sucesivas para poner éstas al descubierto, tal como en [14-16], realizando desbastado de la pieza como en [17, 18], o empleando una técnica no destructiva para la captura de la imagen de la sección, tal como la tomografía computarizada (CT-*Computed tomography*) con rayos X [19, 20] o mediante resonancia magnética.

Una vez obtenidas las imágenes de las diferentes secciones, las mismas deben ser procesadas con algoritmos de detección de contornos, los cuales permiten expresar matemáticamente, por ejemplo por medio de splines [14, 19], los bordes de cada sección. Esta información puede ser empleada posteriormente por un software CAD para la construcción del sólido.

Las principales desventajas para estas técnicas se evidencian cuando resulta imposible cortar o fresar piezas de materiales blandos [14] o elementos únicos que no puedan ser destruidos. Por otro lado, los métodos que emplean CT o resonancia implican costos más elevados y el empleo de personal altamente capacitado [18].

El tercer y último tipo de metodologías empleado para la digitalización de piezas en ingeniería inversa (detección de rango) se asemeja mucho a la reconstrucción por imágenes, excepto que en este método se guarda la información relacionada con la profundidad de cada uno de los puntos de la imagen, tal como en un z-buffering. Esta medición de rango o profundidad se hace normalmente empleando instrumentos láser [21-24], los cuales en muchos casos han desplazado los palpadores tradicionales de las CMM.

En este artículo se presenta una novedosa técnica para la digitalización de un rodete de un compresor centrífugo empleando tomografía computarizada con rayos X. El empleo de esta técnica permite el uso de tomógrafos convencionales, cuyo uso no es apropiado para piezas metálicas, en la reconstrucción de un modelo CAD tridimensional de una pieza de geometría compleja. Adicionalmente, la metodología propuesta permite esta reconstrucción sin tener que recurrir a la destrucción de la pieza, ni al empleo de nubes de puntos (técnica no apta para geometrías complejas como las de los álabes del rodete digitalizado).

CARACTERÍSTICAS DE LA PIEZA A DIGITALIZAR

La pieza a digitalizar se trata del rodete de compresión de un turbo cargador HT3B, como el mostrado en la figura 1, el cual posee las características dimensionales resumidas en la tabla 1.

Tabla 1. Principales características dimensionales del rodete del turbo cargador HT3B.

Diámetro mínimo o interior [mm]	24
Diámetro a la entrada [mm]	76
Diámetro a la salida [mm]	107
Número de álabes	8



Figura 1. Rodete de un turbo cargador HOLSET HT3B.

Esta pieza reúne varias características que hacen compleja la construcción de un modelo sólido computacional. En primer lugar se tiene la compleja geometría de los álabes, que hace muy difícil el empleo de técnicas como

el palpado o la determinación de rango. A este respecto, se observó que la forma curvada de los álabes impedía que un láser alcanzara gran parte de la superficie del cubo del rodete, puesto que interfería entre esta última y la fuente del láser. De otro lado, el reducido espesor de los álabes podía conducir a que en vez de que se interpretaran las superficies de presión y de vacío de cada álate como entidades independientes, se interpretaran como una sola, lo que supondría un espesor de álate nulo. Finalmente, las características de exactitud y precisión del escáner láser disponible no eran las necesarias para reproducir apropiadamente la geometría del rodete.

En cuanto a la toma de información metrológica con máquinas digitalizadoras, se encontró que la disposición y la longitud del palpador de la CMM disponible restringía la correcta medición de la geometría de los canales de flujo, lo cual haría necesario realizar cortes en el rodete para permitir que el palpador ingresara a todas las zonas del mismo, lo cual no era una condición permisible, por tratarse de una pieza única que no podía sufrir ningún tipo de modificación o avería.

Adicionalmente, el material del rodete impedía el uso de máquinas de CT convencionales, dado que las imágenes obtenidas para objetos fabricados en materiales como el acero o el aluminio presentan demasiado brillo, lo que las hace inapropiadas para su posterior procesamiento.

Salvando este último inconveniente, el empleo de CT para la digitalización de una geometría de esta complejidad resultaba en sumo atractivo, dadas las fortalezas ofrecidas por esta técnica. Por lo anterior se decidió el empleo de esta técnica y el planteamiento de una solución que permitiera subsanar el inconveniente del material del rodete.

COPiado DEL RODETE Y CREACIÓN DE UN MODELO EN ACRíLICO

Una de las limitaciones del CT para el análisis y modelamiento de elementos en ingeniería consiste en que éste no produce imágenes útiles cuando se emplea en objetos compuestos por metales como el acero o el aluminio. Debido a esto, y a que el rodete está hecho de fundición de aluminio, fue necesario elaborar un modelo en un material alternativo antes de proceder a tomar la CT.

Por lo expuesto anteriormente, se hizo necesario elaborar en acrílico una serie de modelos del rodete, hasta que se logró obtener uno que presentaba las características necesarias para pasar a la fase de registro de la geometría por medio de tomografías. Una de las ventajas más

importantes que presentaba el método escogido consiste en que el molde, a partir del cual se elabora el modelo, no es rígido, lo cual facilita la extracción del rodete original del molde. El procedimiento que se siguió para la elaboración del último modelo se divide en dos fases: Una primera fase de “toma de la impresión” (que corresponde a la elaboración de un molde) y una segunda fase de “elaboración y refinamiento del modelo”. Estas fases se detallan a continuación.

Fase 1: Toma de la impresión. En esta fase se emplearon los materiales clásicos para la toma de una impresión dental, tales como vaselina, agua, alginato siliconado y cloruro de metileno; se procedió a limpiar la pieza con el cloruro de metileno, para luego cubrirlo completamente con vaselina cuidando de no dejar protuberancia alguna sobre la pieza, la cual eventualmente pudiera generar alguna deformación en el molde; luego de tomar cantidades en volúmenes iguales de agua y alginato, se procedió a agitar esta mezcla hasta que adquirió una consistencia homogénea, para luego sumergir la pieza en la mezcla, hasta que estuvo totalmente cubierta; se esperó hasta que la tonalidad de la mezcla cambió y su consistencia se tornó tipo gel; por último, en esta etapa, se hizo la extracción de la pieza, procurando no hacer daño en el molde.

Fase 2: Elaboración del Modelo. En esta etapa de la elaboración del modelo se utilizó como material del modelo físico acrílico autopolimerizante en polvo, líquido polimerizante y el molde elaborado en la fase anterior; inicialmente se hizo un primer recubrimiento con el acrílico y el líquido polimerizante, sobre el molde mismo, buscando cubrir principalmente las cavidades más estrechas del molde; se mezclaron el acrílico y el líquido en un recipiente independiente, para luego verterlos sobre el molde de la pieza; las proporciones en que deben estar mezcladas estas dos sustancias resultaron no ser únicas, pues según sean estas proporciones, la viscosidad del polímero varía, cambiando así la facilidad de fluidez dentro de las cavidades del molde; en este trabajo, la mezcla requirió de dos partes de acrílico (en volumen) por una de líquido.

Finalmente, y debido a las imperfecciones propias del proceso de moldeado en acrílico, se hizo necesario un refinamiento del modelo mediante tres procedimientos complementarios: relleno de cavidades por burbujas entre la interfaz molde-modelo, agitación para remoción de cavidades internas (antes de la solidificación del acrílico) y pulimento de las protuberancias en el modelo con un micromotor, actividades que fueron llevadas a cabo por especialistas en el desarrollo de este tipo de modelos. Una vez elaborado el modelo en acrílico (ver figura 2), se procedió a tomar la CT.



Figura 2. Rodete original y modelo en acrílico escogido para la toma de tomografías (CT).

Este procedimiento alternativo e innovador fue necesario con el fin de crear tal modelo físico a partir de los medios disponibles en la Universidad Nacional de Colombia.

Dado que el objetivo principal de la reproducción del modelo en acrílico era la obtención del rodete en un material de baja densidad que pudiera ser usado en un equipo CT convencional, para luego reconstruir el modelo virtual, la validación de la calidad del modelo construido sólo podría hacerse a través de la verificación del modelo CAD elaborado.

Efectivamente, tras implementar por primera vez este tipo de prácticas, existen observaciones importantes que deben tenerse en cuenta para su posterior realización; sin embargo, puede afirmarse que el procedimiento propuesto proporcionó un modelo que reprodujo satisfactoriamente las características del rodete original, lo cual se comprobó a partir de la comparación de las principales medidas del mismo.

GENERACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

Superficies características del cubo, la cubierta y la curvatura del rodete del compresor⁵

En la toma de la CT se obtuvieron imágenes transversales del rodete a medida que se avanzaba en dirección axial, siendo 1 mm la distancia de separación entre cada toma, de modo que se necesitaron 54 imágenes para abarcar la totalidad de la longitud del rodete. Una de las imágenes obtenidas en el CT se muestra en la figura 3.

⁵ Se entenderá por *cubo*, *cubierta* y *curvatura*, las traducciones al español de las palabras de origen inglés *hub*, *shroud* y *camber*, respectivamente.

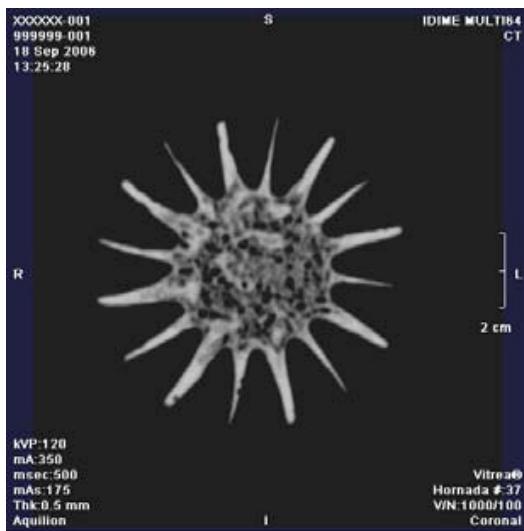


Figura 3. Tomografía axial N° 37 del rodete.

Sathaye [25] indica un procedimiento para generar las superficies que definen la geometría básica del rodete por medio de superficies analíticas, mas también señala que la información que proporciona el método para generar la geometría del rodete (ilustrada en la 4) no es suficiente debido a la escasa cantidad de datos disponibles. Por esta razón fue preciso combinar el método propuesto en [25] con la información obtenida a partir de las tomografías y con datos en [26], como se describe a continuación.

Una vez identificada la línea media, se procede a localizar las esquinas de las tres superficies analíticas que compondrán el álabе y que se encuentran localizadas sobre el cubo y sobre la cubierta. Debe notarse que un punto ubicado sobre la línea media es el punto medio del borde de una superficie analítica que une una esquina de la cubierta con una del cubo. Para hacer más claro este punto, considérese la figura 5, en la que el punto O1' se ubica sobre la línea media y sobre el segmento A'M', del cual es el punto medio. En el modelamiento llevado a cabo, se asumió que la longitud de estos segmentos decrece linealmente de entrada a salida, sin embargo variaciones de tipo parabólico o cúbico son también posibles [25].

Sean O1', O2', O3' y O4' los puntos medios de cada uno de los segmentos que limitan las superficies analíticas y que van del cubo a la cubierta, con O1' ubicado como se muestra en la figura 5. En [25] se afirma que cada una de las proyecciones de los segmentos mencionados se cruzan en un punto común. De esta forma, el ángulo θ (figura 5) puede dividirse en el número de superficies

analíticas escogidas (tres en este trabajo, cuatro en la figura 5), de tal modo que se obtiene el ángulo cubierto por cada una de las superficies.

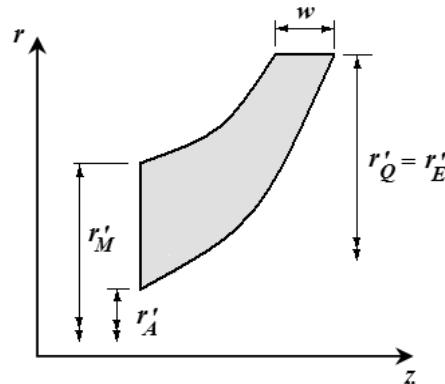


Figura 4. Información básica inicial para la construcción del álabе del rodete [25].

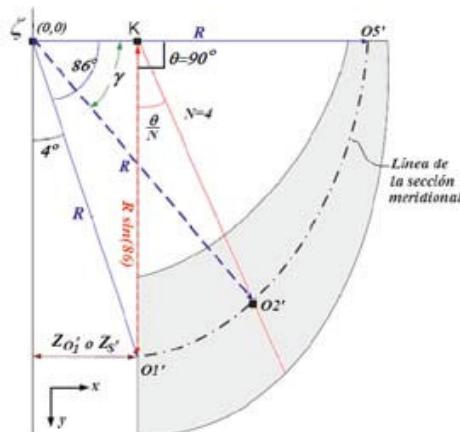


Figura 5. Bosquejo de la superficie meridional para la construcción del álabе del rodete [25].

A partir de lo anterior, puede construirse completamente la superficie meridional de los álabes, puesto que se cuenta con el punto medio, la inclinación (hacia el punto común) y la longitud (a partir de la suposición de decrecimiento lineal) de cada uno de los bordes de las superficies analíticas a utilizar.

Finalmente se procedió a interpolar las coordenadas de las líneas ubicadas sobre el cubo y sobre la cubierta, para lo cual se empleó una curva de interpolación y ajuste, mediante un programa CAD, en cada una de las esquinas

de las superficies analíticas. El resultado puede observarse en la figura 6. Una vez que se ha construido la superficie meridional del rodete se generan las superficies del cubo y de la cubierta rotando las líneas correspondientes a estos elementos alrededor del eje de rotación del rodete.

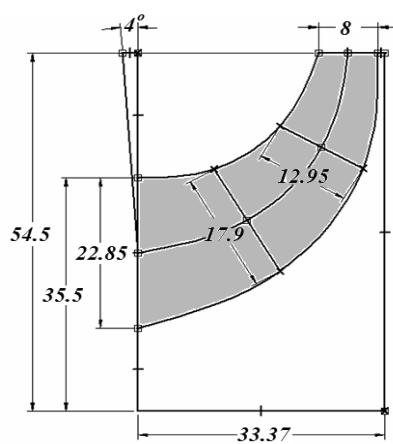


Figura 6. Generación de la superficie meridional (dimensiones en mm).

Construcción del modelo virtual del rodete mediante software CAD 3D

El procedimiento elaborado por Sathaye [25] para la generación de las superficies del cubo y la cubierta fueron de gran utilidad en la construcción del modelo CAD del rodete; sin embargo, el mismo autor reconoce que no suministra suficientes datos para rotar las diferentes secciones de la superficie meridional alrededor del eje de rotación del rodete, de modo que no fue posible continuar con la generación del modelo siguiendo dicha metodología, y en vez de esto fue necesario buscar nuevas alternativas para culminar la generación del modelo virtual del rodete.

Fue así como se decidió acudir a la información que proporcionaban las imágenes del CT a partir de la tomografía 25, en la cual se estimó que terminaba el borde de ataque del álabe. Para la toma de dicha información se utilizó un programa CAD 3D, el cual permitió medir en cada una de las tomografías el ángulo que formaba un álabe específico con la vertical, obteniéndose los valores mostrados en la tabla 2.

Con estos ángulos de rotación pudo trazarse la proyección rotada de la superficie meridional. Para esto fue preciso cortar las superficies del cubo y de la cubierta con planos perpendiculares al eje de rotación del rodete,

separados 1 mm entre sí, como si fueran los planos de las tomografías. Posteriormente, se trazó sobre cada uno de los planos recién creados una línea con el ángulo de rotación especificado para el respectivo plano, de modo que se unieran las superficies de la cubierta y del cubo, como se muestra en la figura 7.

Tabla 2. Ángulo medido entre la vertical y un álabe del rodete.

Tomografía	Ángulo	Tomografía	Ángulo
25	15,01	39	36,77
26	16,93	40	38,01
27	18,78	41	39,22
28	20,56	42	40,40
29	22,28	43	41,55
30	23,93	44	42,68
31	25,54	45	43,78
32	27,09	46	44,85
33	28,60	47	45,90
34	30,06	48	46,93
35	31,48	49	47,94
36	32,86	50	48,93
37	34,20	51	49,90
38	35,50	52	50,85

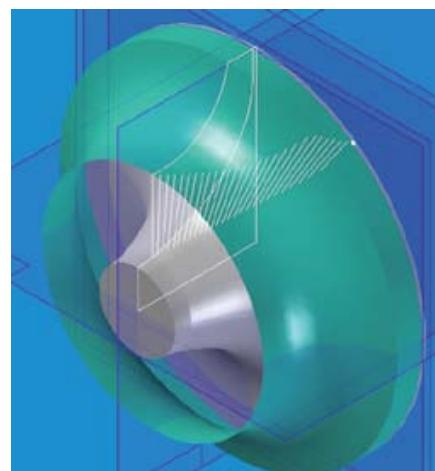


Figura 7. Conjunto de líneas primitivas sobre parte de la superficie de curvatura del álabe.

Una vez que se cuenta con la proyección de la superficie meridional o, en otras palabras, la superficie de curvatura del álabe, es preciso determinar el espesor del mismo.

Debido a que en las imágenes del CT los espesores de los álabes no son uniformes como consecuencia de las imperfecciones del modelo fabricado en acrílico (por presencia de discontinuidades de material), se prefirió acudir a [26] para la selección de un perfil aerodinámico que se ajustara al espesor de los álabes del rodete, escogiéndose como perfil para los mismos el NACA 2306; sin embargo, fue preciso hacer algunas alteraciones finales para obtener un modelo que se acomodara al rodete real:

1. El espesor máximo de los álabes es de 1,5 mm en la superficie de la cubierta. Puesto que el asumir las proporciones especificadas en [26] para el perfil NACA 2306 supondría un espesor mayor que éste, se prefirió mantener como máximo el espesor medido y reducir los demás proporcionalmente.
2. El espesor máximo del álabe sobre las superficies del cubo y de la cubierta es el mismo.

Con las anteriores consideraciones se trazó una serie de líneas sobre la superficie del cubo y de la cubierta, que con la longitud indicada en [26] modificada según se señaló, establecían el espesor del perfil aerodinámico del álabe.

Una vez creadas las proyecciones que se muestran en la Figura 8, se pudieron crear los perfiles aerodinámicos correspondientes en el software CAD 3D haciendo uso de las herramientas disponibles para el trazado de splines a partir de los contornos de las curvas y las superficies limitadas por tales contornos. Finalmente se hizo una proyección (*lofted protrusion*), con lo que se obtuvo el álabe mostrado en la figura 9.

Finalmente se construyó el rodete completo a partir de una operación de arreglo polar de las características sólidas, en la cual se incluyeron los dos tipos de álabe del rodete, como se observa en la figura 10. Vale la pena aclarar que los álabes “auxiliares” (los de menor superficie) fueron elaborados siguiendo la misma metodología utilizada para los álabes principales.

El modelo virtual del rodete obtenido con esta metodología (mostrado en la figura 10) presentó características aptas para el posterior trabajo de simulación, así como características dimensionales equivalentes a las de su contraparte real; este modelo presentó facilidad de importación dentro interfaces de preprocesamiento de software para análisis por CFD y FEA, lo que evidenció adicionalmente la potencialidad del modelo, demostrando que el procedimiento planteado constituye una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de alta complejidad dentro de procesos de ingeniería inversa.

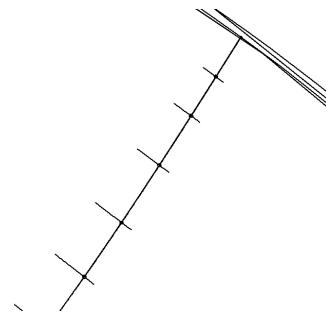


Figura 8. Proyecciones utilizadas para dar espesor al álabe.

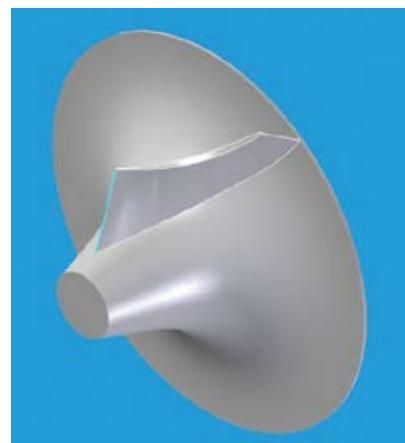


Figura 9. Primer álabe obtenido con la metodología desarrollada.

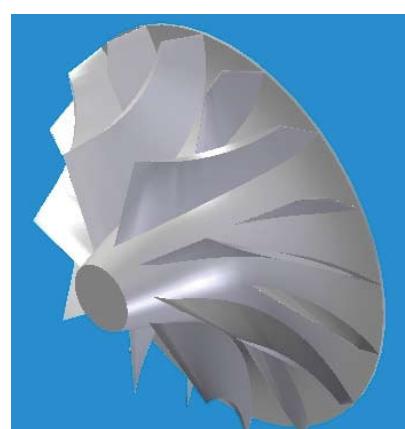


Figura 10. Rodete completo renderizado.



CONCLUSIONES

La digitalización tridimensional presentada en este trabajo es el resultado de la búsqueda de métodos que permitieran construir el modelo geométrico del rodete de un turbo cargador comercial con los recursos disponibles en la Universidad Nacional de Colombia, y de la toma de una serie de decisiones en relación a la forma más efectiva de emplearlos. De esta manera, el presente trabajo introduce una metodología alterna y viable para la digitalización de partes mecánicas de geometría compleja, asequible para quien se interese por la digitalización tridimensional en sitios donde las demás alternativas disponibles para tal fin sean escasas o su empleo sea restringido.

Otra importante conclusión consiste en que la toma de tomografías axiales computarizadas (CT) es una técnica que posee un gran potencial para diversas aplicaciones de ingeniería y, en particular, para la digitalización de elementos tridimensionales. Esta técnica, complementada con el potencial que tienen paquetes de software CAD 3D para construir un sólido a partir de sus secciones transversales, facilita el levantamiento de modelos tridimensionales de objetos de geometría compleja en el campo de la ingeniería y, con seguridad, en muchos otros campos del conocimiento. Sin embargo, es importante anotar que la principal limitante para la utilización de esta técnica es el material del cual se compone el objeto a digitalizar; por esta razón, un paso a seguir en el desarrollo de la metodología planteada en este artículo es el estudio de la viabilidad del uso del CT en objetos de diversos materiales.

En relación al trabajo desarrollado con el modelo en acrílico, debe decirse que si bien este último reprodujo satisfactoriamente las medidas externas del rodete, no permitió explotar al máximo el potencial ofrecido por el software CAD 3D para la construcción de sólidos. Esto ocurrió debido a que, a pesar del procedimiento de refinamiento implementado, la distribución del acrílico dentro del modelo no fue homogénea, lo cual pudo verse en las tomografías como espacios claros u oscuros, dependiendo de si había o no material en una región determinada. Con estas regiones de diferente tono, el sólido creado por el software CAD 3D, a partir de las tomografías, presentaba espacios vacíos en su interior, lo cual no lo hacía apto para el posterior trabajo de simulación. En este sentido, se plantea el estudio de métodos que permitan la construcción de modelos en acrílico u otros materiales que, siendo apropiados para la toma de un CT, también facilitaran los pasos posteriores de modelamiento geométrico al presentar densidades más homogéneas.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar es importante reconocer el apoyo y el interés del grupo de investigación asociado al proyecto “Formulación y evaluación de un sistema alterno de generación local de energía a partir de microturbinas” durante todo el desarrollo de este trabajo. Por otro lado, el levantamiento tridimensional del modelo CAD del rodete no hubiese sido posible sin la ayuda del Doctor Enrique Calvo, profesor de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, y de la Facultad de Odontología de la misma universidad. Gracias por su colaboración.

REFERENCIAS

- [1] Z.Y. Yang and Y.H. Chen. “A reverse engineering method based on haptic volume removing”. *Comput. Aided Des.* Vol. 37 N° 1, pp. 45-54. 2005.
- [2] G. Sansoni and F. Docchio. “Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications”. *Rob. Comput. Integr. Manuf.* Vol. 20 N° 5, pp. 359-367. 2004.
- [3] T. Varady, R.R. Martin and J. Cox. “Reverse engineering of geometric models—an introduction”. *Comput. Aided. Des.* Vol. 29 N° 4, pp. 255-268. 1997.
- [4] K.H. Lee and H. Woo. “Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping”. *Comput. Ind. Eng.* Vol. 38 N° 1, pp. 21-38. 2000.
- [5] X. Zexiao, W. Jianguo and Z. Qiumei. “Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* Vol. 45, pp. 1474-1486. 2005.
- [6] Y. Lina, C. Wang and K. Daib. “Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint”. *Medical Engineering & Physics.* Vol. 27, pp. 189-193. 2005.
- [7] H. Xiang, Y. Liu and S. Sun. “Rapid reconstruction based on coordinate measurement method for complex-shaped parts”. *Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Technology'99*, pp. 618-620. Xi'an, PR China. June 16-19, 1999.
- [8] Y. Zhang. “Research into the engineering application of reverse engineering technology”. *Journal*



- of Materials Processing Technology. Vol. 139, pp. 472-475. 2003.
- [9] Z. Yang and Y. Chen. "A Reverse engineering method based on haptic volume removing". Computer-Aided Design. Vol. 37, pp. 45-54. 2005.
- [10] K. Chui, W. Chiu and K. Yu. "Direct 5-axis tool-path generation from point cloud input using 3D biarc fitting". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Article in press.
- [11] L.C. Chen and G.C.I. Lin. "Reverse engineering in the design of turbine blades: a case study in applying the MAMDP". Robotics and Computer Integrated Manufacturing. Vol. 16, pp. 161-167. 2000.
- [12] M.J. Thali, M. Braun and R. Dirnhofera. "Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries". Forensic Science International. Vol. 137, pp. 203-208. 2003.
- [13] M. Pieraccini, G. Guidi and C. Atzeni. "3D digitizing of cultural heritage". Journal of Cultural Heritage. Vol. 2, pp. 63-70. 2001.
- [14] Z. Liu, L. Wang and B. Lu. "Integrating cross-sectional imaging based reverse engineering with rapid prototyping". Computers in Industry. Vol. 57, pp. 131-140. 2006.
- [15] O. Schmitt. "Image Registration of Sectioned Brains". International Journal of Computer Vision. Vol. 73 N° 1, pp. 5-39. 2007.
- [16] A. Rodríguez, D. Ehlenberger, K. Kelliher, M. Einstein, S. Henderson, J. Morrison and P. Hof, S. Wearne. "Automated reconstruction of three-dimensional neural morphology from laser scanning microscopy images". Methods. Vol. 30, pp. 94-105. 2003.
- [17] C. Chang and H. Chiang. "Three-dimensional image reconstructions of complex objects by an abrasive computed tomography apparatus". Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 22, pp. 708-712. 2003.
- [18] H. Lan, Y. Ding, J. Hong and B. Lu. "A reconfigurable cross-sectional imaging system for reverse engineering based on a CNC milling machine". Int. J. Adv. Manuf. Technol. DOI 10.1007/s00170-007-0962-7. 2007.
- [19] Q. Liwei, Z and Yi, L. Minghui. "Contour segments extraction of 3-D surfaces from layer measurements". Int J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 24, pp. 335-344. 2004.
- [20] B.F. McEwen, M. Radermacher, C.L. Rieder and J. Frank. "Tomographic Three Dimensional Reconstruction of Cilia Ultrastructure from Thick Sections". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 83 N° 23, pp. 9040-9044. Diciembre, 1986.
- [21] J. Chow, T. Xu, S.M. Lee and K. Kengskool. "Development of an Integrated laser-Based Reverse Engineering and Machining System". Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 19, pp. 186-191. 2002.
- [22] C. Feng. "Internet-Based Reverse Engineering". Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 21, pp. 138-144. 2003.
- [23] M. Pieraccini, G. Guidi and C. Atzeni. "3D digitizing of cultural heritage". Journal of Cultural Heritage. Vol. 2, pp. 63-70. 2001.
- [24] M. Wu, J. Tinschert, M. Augthun, I. Wagner, J. Schädlich-Stubenrauch, P. Sahm and H. Spiekermann. "Application of laser measuring, numerical simulation, and rapid prototyping to titanium dental castings". Dental Materials. Vol. 17, pp. 102-108. 2001.
- [25] N. Sathaye. "Initial design specifications for vane geometry of centrifugal compressor impeller by using analytic patches". Michigan State University. Michigan, USA, 2004.
- [26] E.N. Jacobs, K.E. Ward and R.M. Pinkerton. "The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel", NACA Reports. Report N° 460. Diciembre 1999.