

NUEVO ENFOQUE EN EL DISEÑO INTELIGENTE DE IMPLANTES CRANEALES PERSONALIZADOS A TRAVÉS DE KBE

D. Cebrián-Tarrasón ^(p), C. Muñoz, V. Chulvi, R. Vidal

Abstract

The need of adapting intelligent design to the medical domain in order to develop applications adjusted to the needs of patients has driven the creation of tools capable of combining product customization with cost reduction, integrating all the knowledge involved in the process in an organized manner.

The present study investigates a new approach in the application of Knowledge-Based Engineering (KBE) to the automation of the implant design process. Furthermore, the customization of implants is achieved, adapting to the anatomy of the patient and attaining structural, functional and aesthetic biocompatibility.

A KBE based tool, capable of performing customized design of cranial implants, is defined. To that avail, CATIA® software -which incorporates KBE and CAD (Computer Aided Design) modules - is used.

The developed program performs an automatic modelling of a volume that covers an existing skull defect, based on the knowledge gathered and the restrictions indicated by the user. As an added option, the volume generated may be machined using RP (Rapid Prototyping) techniques

Keywords: Knowledge-Based Engineering, KBE, intelligent design, CAD, CATIA, implant

Resumen

La necesidad de adaptar el diseño inteligente al ámbito médico para desarrollar aplicaciones ajustadas a las características del paciente impulsa la creación de herramientas capaces de aunar la personalización del producto con la reducción de costes, integrando todo el conocimiento del proceso de manera organizada.

Este estudio investiga un nuevo enfoque para la aplicación de la Ingeniería Basada en el Conocimiento (KBE, Knowledge-Based Engineering) en la automatización del proceso de diseño de implantes. Además, se logra la personalización de dichos implantes, adaptándose a la anatomía del paciente y consiguiendo una biocompatibilidad estructural, funcional y estética.

Se define una herramienta basada en KBE capaz de realizar un diseño personalizado de implantes para la zona craneal. Para tal fin, se utiliza la herramienta informática CATIA®, donde están incluidos como módulos los sistemas KBE y CAD (Computer-Aided Design).

El programa creado realiza un modelado automático de un volumen para cubrir un defecto craneal existente a partir del conocimiento recogido y de las restricciones indicadas por el usuario. Se añade la posibilidad de que el volumen generado sea mecanizado mediante técnicas de prototipado rápido (RP, Rapid Prototyping).

Palabras clave: Ingeniería Basada en el Conocimiento, KBE, diseño inteligente, CAD, CATIA, implante

1. Introducción

Actualmente, la sociedad demanda productos más adaptados a sus necesidades con un coste más reducido y disponibles en el menor tiempo posible y, por otro lado, los fabricantes desean tener un control mayor sobre el ciclo de vida de un producto. En el ámbito médico, estos aspectos adquieren una mayor relevancia, pues la personalización estética es un factor muy valorado por los pacientes. Concretamente en el campo de la implantología, es necesaria la optimización del proceso de diseño de implantes.

Los implantes craneales, cuyo objetivo es reconstruir defectos congénitos o adquiridos (p. ej. traumatismos craneales o tumores cerebrales), requieren una planificación cuidadosa con el fin de obtener un resultado adecuado (Wu et al., 2006).

Hasta finales del s. XX el proceso de diseño de dichos implantes ha sido laborioso y con un elevado coste económico (Eufinger et al., 2006). Con la introducción de técnicas basadas en el procesamiento de imágenes en 3D, tecnologías asistidas por ordenador (Computer Aided technologies - CAx) y procesos de fabricación más eficientes a partir de RP, se han logrado reducir parcialmente los costes (Hieu et al., 2005). No obstante, no se ha conseguido una total automatización del proceso al ser necesaria la creación de un implante genérico, el cual, posteriormente, se modifica y adecua para cada paciente (Hierl et al., 2006).

El diseño automatizado ha logrado grandes avances en el sector industrial (automoción y aeronáutica fundamentalmente) a partir de la gestión del ciclo de vida del producto (Product Lifecycle Management - PLM) (Kochan, 1999, Liening and Blount, 1998). No obstante, como los procesos industriales generalmente son difícilmente secuenciables, los sistemas de programación tradicional se han mostrado a menudo ineficaces (Chapman and Pinfold, 1999). Por el contrario, los sistemas basados en el conocimiento han experimentado un auge enorme al capturar y, sobre todo, almacenar la experiencia adquirida por los profesionales durante su trabajo y formación. Eso ha permitido la aplicación de sistemas basados en KBE en diferentes ambientes industriales (Cooper et al., 1999, Preston et al., 2005).

En el diseño de implantes hay pocas investigaciones referidas a sistemas KBE (Hieu et al., 2005). Dooley (1988) fue uno de los pioneros al desarrollar un sistema para la fabricación de implantes basado en inteligencia artificial y sistemas CAD. Whittaker (1991) introdujo un sistema KBE al desarrollar brevemente un modelo para el diseño personalizado de una cadera. Posteriormente se han desarrollado otros estudios sobre la adquisición de conocimiento en el diseño de implantes (Wu, Fietena and Engelhardt, 2006, Tziouvas, 2006).

El estudio sobre el diseño personalizado de implantes craneales se ha centrado en las siguientes tres fases: conversión del formato de imágenes de tomografías computerizadas para su posterior manejo a través de programas informáticos basados en CAx, empleo de técnicas de ingeniería inversa para el diseño del implante y la utilización de formatos adecuados para su posterior fabricación a través de técnicas de RP (Hieu et al., 2005, Wu, Fietena and Engelhardt, 2006, Galantucci et al. 2006).

El propósito de este artículo es proporcionar una nueva perspectiva en el diseño personalizado de implantes craneales. Para ello, haciendo uso del programa informático CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) se crea una aplicación independiente, la cual permite que el usuario sea capaz de interactuar con el sistema para obtener un diseño óptimo. Este hecho logra que se adapte el conocimiento disponible a las

restricciones, tanto de la geometría craneal como de la anatomía del paciente, eliminando prácticamente la necesidad de revisión del implante por parte del cirujano.

2. Métodos

El objetivo de este estudio es desarrollar una aplicación informática con objetivo de mostrar la automatización del diseño personalizado de implantes craneales basada en la tecnología KBE haciendo uso del programa CATIA.

2.1 Ingeniería Basada en el Conocimiento

La ingeniería basada en el conocimiento (KBE) es una disciplina con base en CAx y sistemas basados en el conocimiento (KBS- Knowledge-Based Systems) pero que tiene diversas definiciones y funciones dependiendo del contexto de su aplicación (Penoyer et al. 2000). En el ámbito de la ingeniería del diseño, KBE se puede definir como el desarrollo de una estructura, a partir de la cual se puede implementar un diseño automático, haciendo uso del conocimiento experto sobre el ciclo de vida de un producto (Chapman and Pinfold, 1999, Vidal and Mulet, 2006).

Por ello, un sistema KBE requiere almacenar el conocimiento necesario para el posterior desarrollo de una aplicación para la cual se ha creado. Penoyer et al. (Penoyer et al., 2000) han clasificado diferentes tipos de sistemas KBE dependiendo del tipo de problema al cuál se aplique: generativo, consultivo, innovador y selector.

Los principales modelos para un sistema KBE son el modelo generativo y el modelo consultivo. Por un lado, el modelo generativo indica que el modelado del producto es creado en base a un conjunto de reglas codificadas permitiendo la generación automática de los datos del producto. El punto inicial del diseño es un conjunto de reglas más que un concepto geométrico. Para poder lograrlo, se precisa de una comprensión detallada del producto, en términos de su función, estructura y comportamiento. Desde este modelo genérico, la geometría y otros datos del producto pueden ser generados automáticamente para un rango de productos similares de características funcionales semejantes. Las características de especialización de estos ejemplos de modelos genéricos pueden ser especificadas por los usuarios finales del diseño (Bermell-García et al., 2001).

Por otro lado, el modelo consultivo resalta la naturaleza basada en reglas. Dichas reglas relativas al amplio rango de las disciplinas y actividades de desarrollo de productos pueden ser creadas dentro del modelo generativo. Ejemplos del modelo consultivo son la generación automática de redes de elementos finitos y herramientas de mecanizado unidas a la geometría de las partes del producto (Preston, Chapman, Pinfold and Smith, 2005).

La aplicación creada se ha basado en el sistema KBE haciendo uso del modelo generativo. Con tal fin, se ha considerado que la herramienta adecuada para poder llevar a cabo este proceso sea CATIA.

2.2 CATIA

A pesar de los estudios llevados a cabo para la aplicación formal del conocimiento en el proceso de diseño, se han creado pocas soluciones complejas de sistemas KBE que permitan integrar la aplicación del conocimiento con las funciones modernas de los sistemas CAx. Este tipo de aplicaciones se considerarían sistemas abiertos, independientes de cualquier otra aplicación (Vidal and Mulet, 2006, Skarka, 2007). Por otro lado, hay un grupo de sistemas CAx que tienen la posibilidad real de representar y almacenar el conocimiento en forma de funciones *listas para usar*. La principal base para su aplicación es la conexión perfectamente establecida entre el conocimiento obtenido de procesos particulares a través de reglas, entidades estructurales y funcionales del producto de diseño y sus restricciones.

En dicho grupo se encuentran Unigraphics NX (Siemens) y CATIA (Dassault Systems), los cuales se podrían considerar sistemas interactivos.

Como sistema interactivo, el programa CATIA tiene una estructura dividida en módulos. Dichos módulos agrupan funciones similares para una misma especialización. El módulo de conocimiento de CATIA (*Knowledgware*) forma un módulo especializado agrupando funciones relacionadas con el conocimiento, permitiendo enlazar características de diseño con elementos de dicho conocimiento. Dispone de varios submódulos de los cuales los más importantes son:

- Asesor de conocimiento (Knowledge advisor)
- Experto en conocimiento (Knowledge expert)
- Plantilla de conocimiento del producto (Product knowledge template)
- Plantilla de conocimiento del proceso de mercado (Business process knowledge template)

Estos módulos componen muchas funciones que permiten la automatización en la elección de las características del diseño a través del uso de diferentes formas de representación del conocimiento por herramientas preparadas para tal fin:

- Parámetros – Herramienta básica para parametrizar un componente.
- Fórmulas – Relación de características entre partes separadas.
- Tablas de diseño – Determinación de familias de dimensiones de productos.
- Reglas y chequeo – Implantación de determinadas características de un producto para establecer las restricciones relevantes a su ciclo de vida.
- Copia maestra, características del usuario, plantilla de documento – permiten la reutilización de las características de un producto.
- Reacciones – permiten proporcionar un comportamiento a un componente.
- Conjunto de ecuaciones – resuelven ecuaciones y desigualdades.
- Guión (script)

El *script* es un programa informático escrito para un lenguaje de programación interpretado. Para tal fin, CATIA utiliza VBScript (Visual Basic Script). En dicho lenguaje se utilizan las APIs (Application Programming Interface - Interfaz de Programación de Aplicaciones), conjunto de llamadas al sistema que ofrecen acceso a los servicios del sistema desde los procesos. La principal ventaja consiste en que proporcionan un conjunto de funciones de uso general, simplificando la tarea de la programación.

El formato del archivo de la imagen 3D que se maneja en CATIA es STL (Stereolithography), el cual puede ser transferido a una máquina de RP, nombre que recibe la tecnología utilizada para la fabricación tridimensional del implante directamente desde CAx. Con este sistema se obtiene una mejora del diseño, así como una reducción en el tiempo de fabricación, con una mejor utilización del material y excelentes tolerancias.

3 Resultados

El punto de partida de la aplicación KBE fue la imagen 3D en formato STL, la cual nos permitió localizar y calcular la zona donde se requería el implante. A partir de esta información geométrica, y por medio del conocimiento del modelado, se generó automáticamente un volumen para cubrir el defecto existente en el cráneo, de tal manera

que el diseño creado incluye la forma geométrica, el espesor, y las características físicas del implante.

Para simplificar la resolución del problema, inicialmente el desarrollo de la aplicación se basó en una imagen 3D de una sección esférica en el que se habían realizado varios orificios de diversos tamaños (Figura 1) con el objetivo que el usuario final de la aplicación pudiera elegir el hueco a rellenar.

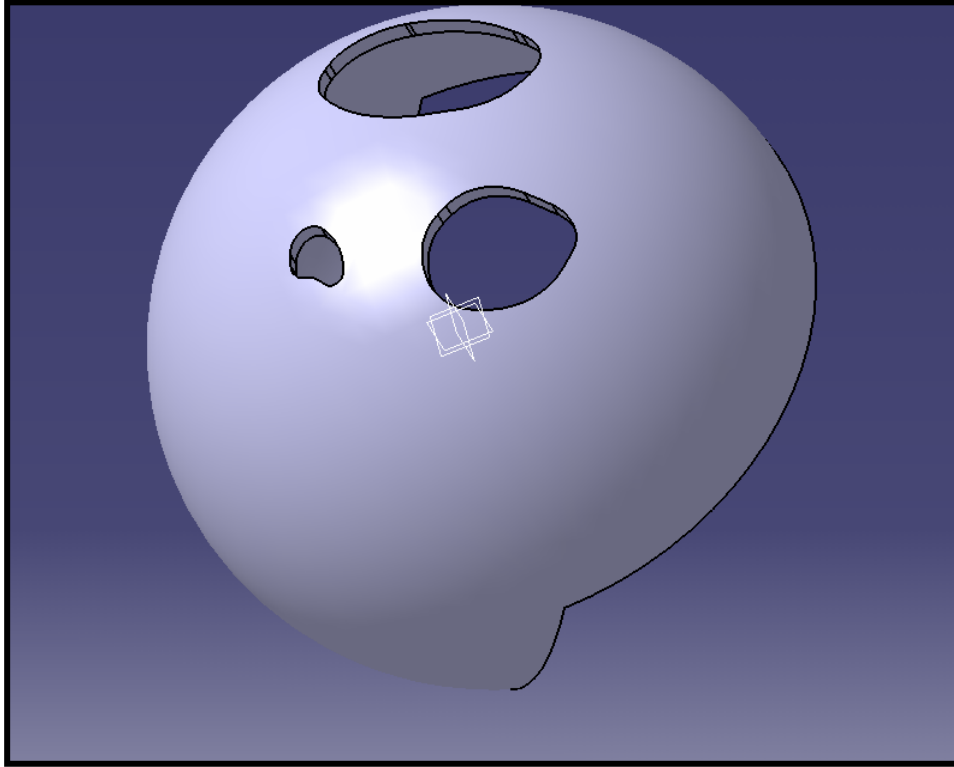


Figura 1: Sección de esfera con orificios

Con tal fin, el modelado se realizó de la siguiente manera:

1. Definición del proceso de modelado a través de herramientas CAD.
2. Automatización del diseño a través del módulo KBE.
3. Adaptación del proceso de modelado al usuario final.
4. Conversión del volumen final para ser utilizado a través de técnicas de fabricación por RP.

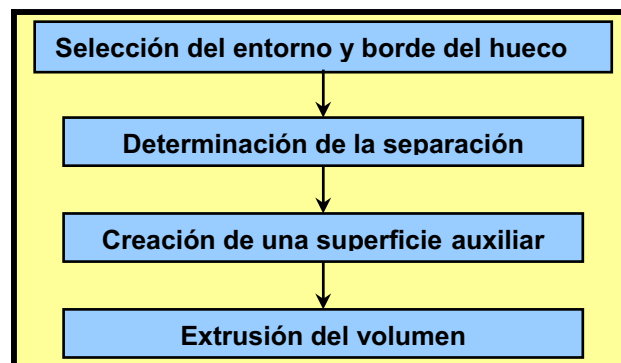


Figura 2: Algoritmo de resolución del modelado

Definición del proceso de modelado a través de herramientas CAD

Utilizando el módulo CAD de CATIA se determinaron manualmente los distintos pasos necesarios para definir el modelado del recubrimiento del hueco, de tal manera que constituyera un proceso que posteriormente pudiera automatizarse (Figura 2).

Para ello se definieron los siguientes pasos:

- Localización de los agujeros existentes en la superficie del objeto a través del análisis del contorno de la figura.
- Establecimiento de una distancia de separación desde el contorno del agujero que servirá de base para la creación del contorno de un área nueva.
- Creación de una superficie auxiliar a partir del contorno establecido.
- Extrusión del volumen del implante desde la superficie creada.

Automatización del diseño a través del módulo KBE

La mayoría de las instrucciones utilizadas en el programa creado están desarrolladas a través de APIs. Una vez que el proceso de modelado había sido definido, las instrucciones fueron grabadas en una macro a través de código interpretado en el lenguaje VBScript. Dicho código fue modificado para que el usuario pudiera elegir el agujero deseado (en el caso que hubieran más de uno) y tuviera conocimiento de las medidas del volumen creado.

Adaptación del proceso de modelado al usuario final

A continuación, el programa había de incluir determinadas reglas y restricciones para el usuario final. Estas reglas procedieron del conocimiento obtenido a partir de sistemas de implantes usados en craneotomías y patentes relacionadas. Un ejemplo de las reglas inferidas a partir del conocimiento fue la referida a la distancia necesaria entre el hueco (defecto craneal) y el volumen modelado (implante). El resultado del programa se muestra en la figura 3.

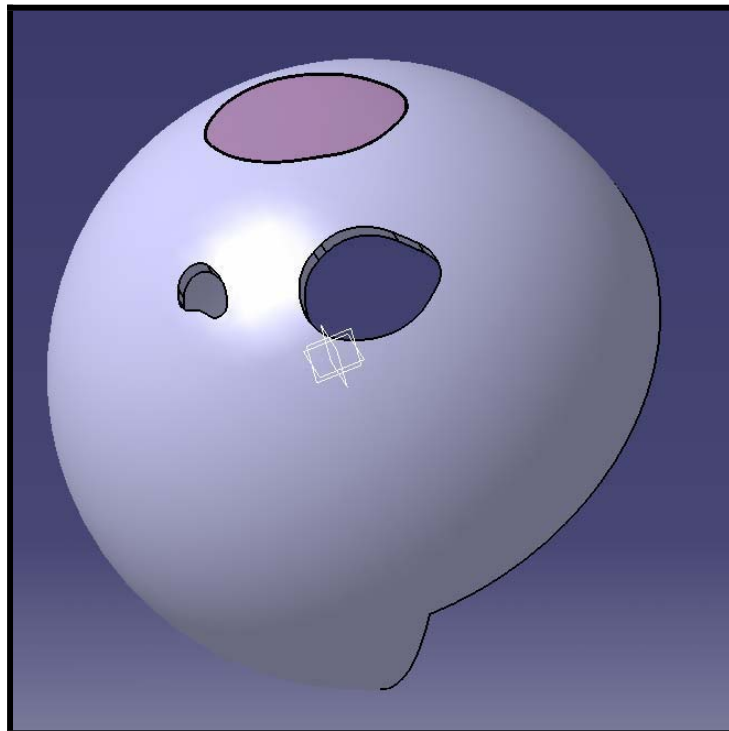


Figura 3: Sección esférica con orificio tapado

Conversión del volumen final para fabricación por RP

Finalmente, se añadió una instrucción al código creado para que el volumen resultante se pudiera exportar en formato STL compatible con el proceso de fabricación, en este caso RP, y que fue utilizado para obtener el modelo del cráneo.

Una vez resuelto el problema planteado para el volumen esférico, se comprobó la funcionalidad de la aplicación creada para una imagen 3D de un cráneo en formato STL (figura 4).

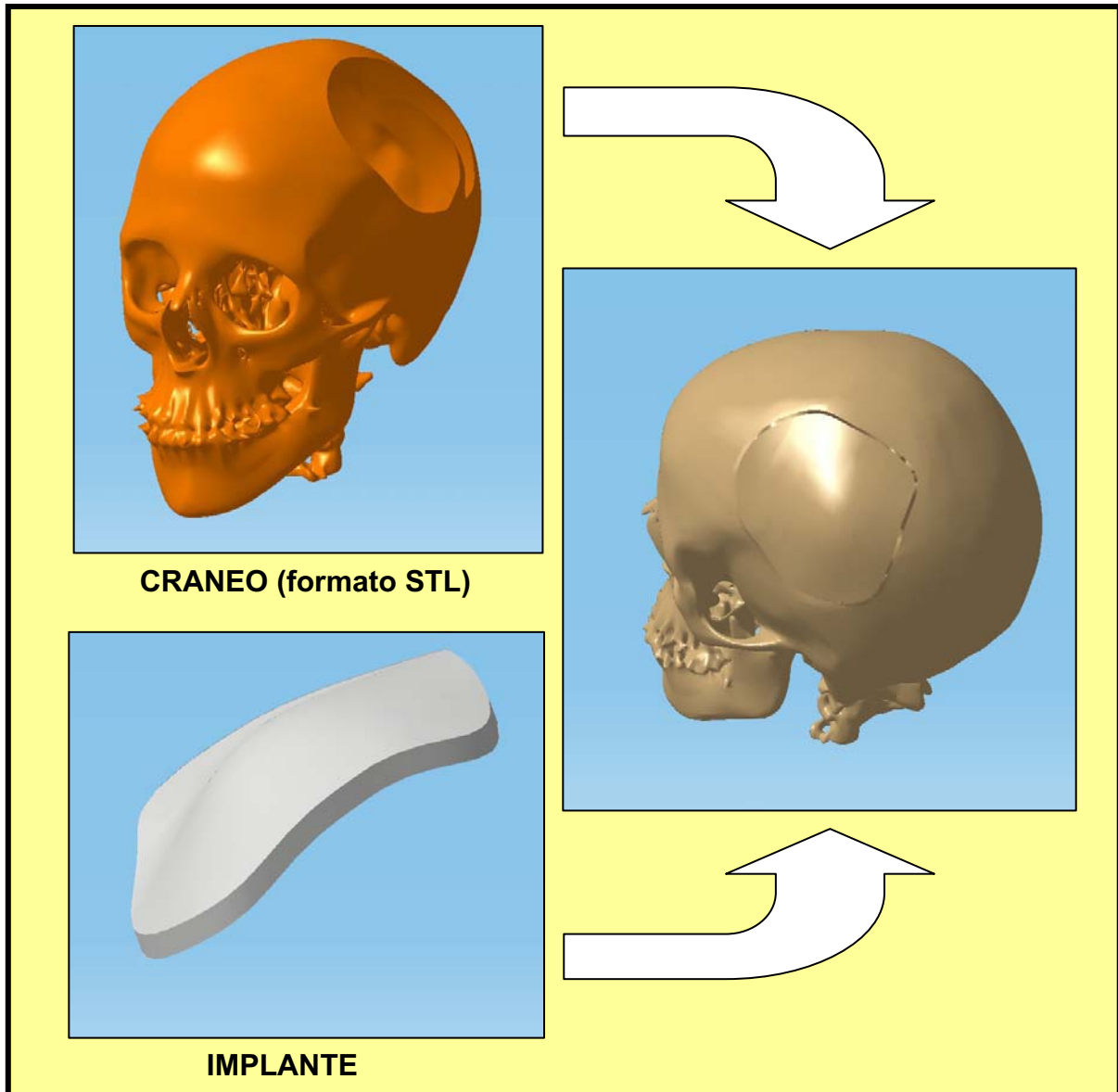


Figura 4: Diseño del implante para un cráneo

4. Conclusión

En este artículo hemos presentado un nuevo enfoque para el diseño inteligente de implantes craneales personalizados. Este estudio muestra una aplicación basada en un método a partir del cual los implantes personalizados adquirirán una mejora notable consiguiendo una mayor biocompatibilidad estructural, funcional y biológica con el paciente mejorando la calidad de vida de éstos, lo cual conducirá a una cirugía menos invasiva que permitirá el incremento de calidad de vida en los pacientes. Dicha automatización permitirá reducir ostensiblemente el tiempo de diseño y, por tanto, los costes.

Este programa logra una nueva perspectiva en el campo de la implantología craneal al mostrar la posibilidad de englobar el conocimiento disponible no sólo de la anatomía del cráneo, sino también del conocimiento médico. Esto permite que se cree una aplicación capaz de adaptarse a las necesidades del entorno médico ofreciendo una compatibilidad completa con las fases del proceso de producción. Así se posibilita la automatización del proceso sin necesidad de crear un implante genérico previo, eliminando la fase de ajustes por parte del cirujano en la etapa de fabricación.

Igualmente, se ha demostrado como el programa CATIA dispone de las herramientas adecuadas para la creación de una aplicación completamente personalizable, adaptable a las necesidades del usuario final. A partir del archivo de un cráneo en formato STL, dicha aplicación ha permitido desarrollar el diseño del implante y posteriormente retornarlo al mismo formato para su fabricación por técnicas de RP.

El programa creado muestra que el proceso de diseño automático de implantes es posible a través de KBE. Sin embargo, el conocimiento médico debe ser ampliado para considerar todos aquellos aspectos relevantes referidos al sistema KBE: información completa del paciente para prevenir futuras complicaciones, base de datos de cráneos, o las diferentes características de los implantes disponibles. Igualmente se debe mejorar la adaptación de la geometría del implante al cráneo.

En un futuro cabría la posibilidad de seguir desarrollando esta aplicación aplicando la metodología MOKA (Methodology Oriented to Knowledge Application), la cual permitiría recopilar todo el conocimiento necesario para optimizar el diseño. Dicha metodología se podría enlazar con el programa CATIA a través de una ontología (Skarka, 2007).

Se ha demostrado que esta aplicación establece las bases del diseño inteligente al conseguir que, a partir de un sistema definido de reglas y restricciones, se pueda definir un diseño óptimo para el implante. Esto va a permitir una vía práctica para el desarrollo de programas capaces de almacenar el conocimiento médico disponible para la mejora de procesos de diseño de implantes.

5. Referencias

Wu, T., Fietena, L. and Engelhardt, M. (2006), "Knowledge-based individual implant design based on reference models for craniofacial reconstruction", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 1, pp 259-261.

Eufinger, H., Weihe, S., Scherer, P., Rasche, C. and Wehmoller, M. (2006), "Management of cranial and craniofacial bone defects with prefabricated individual titanium implants: Follow-up and evaluation of 166 patients with 169 titanium implants from 1994 to 2000", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 1, pp 197-203.

Hieu, L.C., Zlatov, N., Vander Sloten, J., Bohez, E., Khanh, L., Binh, P.H., Oris, P. and Toshev, Y. (2005), "Medical rapid prototyping applications and methods", *Assembly Automation*, Vol. 25, pp 284-292.

Hierl, T., Wollny, G., Schulze, F.P., Scholz, E., Schmidt, J.G., Berti, G., Hendricks, J. and Hemprich, A. (2006), "CAD-CAM implants in aesthetic and reconstructive craniofacial surgery", *Journal of computing and information technology*, Vol. 14, pp 65-70.

Kochan, A. (1999), "Jaguar uses knowledge-based tools to reduce model development times", *Assembly Automation*, Vol. 19, pp 114-117.

Liening, A. and Blount, G.N. (1998), "Influences of KBE on the aircraft brake industry", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 70, pp 439-444.

Chapman, C.B. and Pinfold, M. (1999), "Design engineering--a need to rethink the solution using knowledge based engineering", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 12, pp 257-267.

Cooper, S., Fan, I. and Li, G. (1999), "Achieving competitive advantage through knowledge-based engineering", *Department of Trade and Industry*, UK.

Preston, S., Chapman, C., Pinfold, M. and Smith, G. (2005), "Knowledge acquisition for knowledge-based engineering systems", *International Journal of Information Technology and Management*, Vol. 4, pp 1-11.

Tziovaras, O. (2006), "Customised implant design for the knee joint", *Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Vol. 1, pp 630-635, en Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia.

Dooley, R.L., Heimke, G., Dingankar, A., Berg, E. and Kimbrough, E. (1988), "Automated design and analysis system for design of custom orthopedic implants", *Proceedings of the first international conference on Industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems*, Vol. 1, pp 405-412.

Whittaker, D. (1991), "Custom-designed hip implants through knowledge-based engineering", *Materials & Design*, Vol. 12, pp 103-104.

Galantucci, L.M., Percoco, G., Angelelli, G., Lopez, C., Introna, F., Liuzzi, C. and De Donno, A. (2006), "Reverse engineering techniques applied to a human skull, for cad 3d reconstruction and physical replication by rapid prototyping", *Journal of Medical Engineering & Technology*, Vol. 30, pp 102 - 111.

Vidal, R. and Mulet, E. (2006), "Thinking about computer systems to support design synthesis", *Communications of the ACM*, Vol. 49, pp 100-104.

Penoyer, J., Burnett, G., Fawcett, D. and Liou, S. (2000), "Knowledge based product life cycle systems: Principles of integration of KBE and C3P", *Computer-Aided Design*, Vol. 32, pp 311-320.

Bermell-García, P., Fan, I.-S., Li, G., Porter, R. and Butter, D. (2001), "Effective abstraction of engineering knowledge for KBE implementation", *13 International Conference on Engineering Design*, Vol. 28 pp 99-106 en 13 International Conference on Engineering Design, Glasgow.

Skarka, W. (2007), "Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, In Press, Corrected Proof.

Agradecimientos

La investigación presentada en este artículo fue subvencionada por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (proyecto referencia: FIT-300100-2006-64) y por el Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto referencia DPI2006-15570-C02), dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (2004-2007).

Los autores también agradecen profundamente la cooperación por parte del equipo de Plastiasite, S.A., Neos Surgery, S.L. y Fundación ASCAMM, especialmente a Irene Cantos (Neos Surgery), Alex Sancho y Ricard Jiménez (ASCAMM) y así como al grupo de Ingeniería de Diseño (GID) de la Universitat Jaume I de Castellón.

Correspondencia

David Cebrián Tarrasón
Grupo de Ingeniería de Diseño (GID)
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I.
Av. Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana, España.
Phone: +34 964 729252 Fax: +34 964 728106
E-mail: dazebri@gmail.com
URL: <http://www.gid.uji.es>

Carlos Muñoz Marzá
Grupo de Ingeniería de Diseño (GID)
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I.
E-mail: cmunoz@emc.uji.es

Vicente Chulvi Ramos
Grupo de Ingeniería de Diseño (GID)
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I.
E-mail: chulvi@guest.uji.es

Rosario Vidal Nadal
Grupo de Ingeniería de Diseño (GID)
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I.
E-mail: vidal@emc.uji.es