

Diseño y fabricación de prótesis faciales utilizando técnicas modernas de la ingeniería

MEDELLIN-CASTILLO, Hugo Iván†* & MÉNDEZ-RUIZ, Verónica

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Recibido Octubre 12, 2015; Aceptado Enero 28, 2016

Resumen

En la actualidad es común conocer personas que desafortunadamente tienen un grado de deformidad facial, tal como la ausencia o pérdida de un pabellón auricular, de la nariz, de un ojo, de una parte de la mejilla o labio, etc. Las causas de una deformidad facial pueden ser un accidente, actos bélicos o guerras, enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes, quemaduras, amputaciones o deformidades faciales congénitas. El uso de prótesis es una solución al problema de deformidades faciales, la cual permite brindar una rehabilitación natural al paciente. Existen diferentes métodos para fabricar una prótesis facial, siendo el más común la fabricación artesanal de la prótesis, lo cual requiere tiempo, experiencia y habilidades del cirujano especialista. En el presente trabajo se propone un nuevo método de diseño y fabricación de prótesis faciales basado en el uso de tecnologías modernas de la ingeniería. El objetivo es demostrar que el uso de tecnologías modernas de la ingeniería puede mejorar el proceso tradicional de diseño y fabricación de prótesis faciales. Para ello se analiza un caso de estudio correspondiente al diseño y fabricación de una prótesis auricular. Las ventajas y desventajas del método propuesto son analizadas y comparadas con el método tradicional.

Prótesis faciales, prótesis auricular, escaneo 3D, ingeniería inversa, manufactura rápida

Abstract

Nowadays it is common to find people who unfortunately have a degree of facial deformity, such as the lack or loss of an ear auricle, the nose, an eye, a portion of the cheek or lip, etc. The causes of a facial deformity can be an accident, wars, degenerative diseases such as cancer and diabetes, burns, amputations, or congenital facial deformities. The use of prosthesis is a solution to the facial deformation problem, which allows the natural rehabilitation of the patient. There are different ways to fabricate a facial prosthesis; the most common method is the craftsmanship technique, which depends on the time, experience and skills of the specialist. In this paper a new method to design and fabricate facial prosthesis based on the use of modern engineering technologies is proposed. The aim is to demonstrate that the use of modern engineering technologies can enhance the traditional design and fabrication process of facial prostheses. A case study of the design and fabrication of an auricular prosthesis is analyzed. The advantages and disadvantages of the proposed method are analyzed and compared with the traditional approach.

Facial prostheses, auricular prosthesis, 3D scanning, reverse engineering, rapid manufacture

Citación: MEDELLIN-CASTILLO, Hugo Iván & MÉNDEZ-RUIZ, Verónica. Diseño y fabricación de prótesis faciales utilizando técnicas modernas de la ingeniería. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2016, 3-6: 8-22.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: hugoivanmc@uaslp.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En el mundo existe una gran cantidad de personas que tienen un grado de deformidad facial. Las causas de estas deformidades son los accidentes, actos bélicos y guerras, enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes, amputaciones, malformaciones congénitas, entre otras. Algunos tipos de deformidades faciales incluyen la ausencia o pérdida del oído, nariz, ojo, o una porción de la mejilla o el labio. Las prótesis buco-maxilo-faciales pueden ser clasificadas como: oculares, orbitales, nasales, auriculares, craneales, y para corrección de defectos maxilares y mandibulares. En el caso de los defectos auriculares, el paciente puede presentar pérdida parcial o total del pabellón auricular (Jankielewicz *et al.* 2003). En México la incidencia de las deformidades auriculares es de 1 en cada 6,000 nacimientos, siendo las causas heterogéneas, incluyendo alteraciones genéticas, teratógenos y anomalías vasculares durante la morfogénesis embrionaria, así como factores hereditarios y familiares. Otros factores importantes que causan la pérdida del oído externo son enfermedades relacionadas al cáncer y accidentes que provocan un trauma en la región maxilofacial. Las consecuencias en el paciente son malformaciones en el oído que constituyen una alteración estético-funcional.

Las personas con una deformación facial comúnmente están expuestas a las críticas, presión o aislamiento de la sociedad y de ellos mismos. Su apariencia los desalienta a mezclarse con personas de apariencia física normal. Por tanto, uno de los pensamientos más fuertes de una persona afligida es encontrar alguna solución para restaurar su apariencia normal en el menor tiempo posible (Chua *et al.* 2000, Jankielewicz *et al.* 2003).

Para resolver este problema existen diversas alternativas terapéuticas tales como: la reconstrucción por métodos quirúrgicos, el uso de prótesis, y recientemente la regeneración del tejido u órgano. La reconstrucción por métodos quirúrgicos tiene buenos resultados, sin embargo presenta una serie de desventajas que se deben tomar en cuenta: la intervención quirúrgica, las complicaciones asociadas a la zona donadora y en la zona reconstruida, y la necesidad de múltiples procedimientos quirúrgicos (de dos a seis). Estos factores hacen que la reconstrucción quirúrgica sea un procedimiento complejo y poco accesible a pacientes con escasos recursos económicos, además no todos los pacientes son candidatos a cirugía; elementos como la edad, estado de salud y disponibilidad del paciente para llevar a cabo múltiples cirugías son de vital importancia antes de iniciar el tratamiento.

Por otro lado, la regeneración del tejido es un método moderno de la ingeniería tisular en el cual se busca que los tejidos u órganos se regeneren a partir de células madre depositadas en un andamio de material biodegradable. Aun cuando este método resulta ser muy beneficioso, aún se encuentra en su etapa de investigación desarrollo. El uso de prótesis es una solución eficiente y económica a las deformidades faciales ya que evita complicaciones asociadas a la zona donadora, complicaciones quirúrgicas y produce un buen resultado estético. En este método la edad del paciente no es importante, el costo es accesible y se pueden considerar personas que han sido sometidas a radioterapia o algún tratamiento fallido de reconstrucción por métodos quirúrgicos. Entre las desventajas se pueden mencionar la dependencia en la habilidad artesanal y experiencia en modelado del especialista, lo que compromete la calidad y apariencia final de la prótesis.

Otra desventaja es la utilización en algunos casos de adhesivos para piel como método de fijación de la prótesis, lo cual puede ocasionar irritación en el paciente.

En la actualidad, la cooperación entre la ingeniería y la medicina ha resultado en una integración exitosa de los instrumentos y tecnologías disponibles.

Diversos estudios multidisciplinarios han demostrado la oportunidad de compartir tecnologías innovadoras y abrir camino en el desarrollo de nuevos procedimientos. Las tecnologías modernas de diseño y manufactura en ingeniería, tal como el Escaneo 3D, los sistemas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), la Ingeniería Inversa (RE) y la Manufactura Rápida (RM) (también conocida como Prototipado Rápido, RP), han sido concebidas y desarrolladas en el sector industrial. Sin embargo, recientemente estas técnicas han empezado a ser utilizadas como herramientas en el campo de la medicina (Hieu *et al.* 2005, Gibson *et al.* 2006).

La Cirugía Asistida por la Ingeniería (EAS) es un nuevo campo de investigación ahora aceptado internacionalmente por Instituciones de Salud y se define como “La aplicación de la ingeniería y la manufactura en el cuidado de la salud” (Lohfeld *et al.* 2007).

El objetivo de la EAS es mejorar los procedimientos médicos para mejorar el servicio ofrecido a los pacientes en áreas como la visualización 3D de partes anatómicas, planeación quirúrgica, diseño de implantes y fabricación de prótesis.

En el presente trabajo se propone un nuevo método de diseño y fabricación de prótesis faciales basado en el uso de técnicas modernas de la ingeniería.

El objetivo es demostrar que el uso de tecnologías modernas de la ingeniería puede mejorar el proceso tradicional de diseño y fabricación de prótesis faciales. Para ello se analiza un caso de estudio correspondiente a una prótesis auricular, identificando ventajas y desventajas del nuevo método en comparación con el método tradicional.

Antecedentes teóricos

Existen diversos trabajos de investigación relacionados a la fabricación de prótesis e implantes anatómicos utilizando técnicas modernas de la ingeniería, entre las que destacan la Ingeniería Inversa (RE) y la Manufactura Rápida (RM) (también conocida como Prototipado Rápido, RP). La aplicación del prototipado rápido en la manufactura de prótesis e implantes fue inicialmente propuesto en la década pasada, obteniéndose algunos de los primeros resultados (Popat 1998, Kermer *et al.* 1998). Sin embargo, a pesar de los logros y avances que se han obtenido hasta la fecha, el uso de las nuevas tecnologías de la ingeniería está limitado a ciertos materiales y tipos de implantes o prótesis. El RP ha sido aplicado en varias áreas de la medicina: cirugía craneal, cirugía maxillofacial, cirugía dental, neurocirugía, ortopedia, otorrinolaringología, e ingeniería de tejidos. Estas aplicaciones pueden ser divididas en tres grupos principales (Hieu *et al.* 2005):

1. Diseño y manufactura de biomodelos, implantes y guías quirúrgicas.
2. Desarrollo de modelos para entrenamiento quirúrgico y dispositivos médicos.
3. Diseño y manufactura de estructuras para ingeniería de tejidos y órganos.

Varios trabajos de investigación se han reportado al respecto, entre los que destacan los siguientes.

Chua *et al.* 2000, presentaron el desarrollo de prótesis auriculares utilizando diferentes técnicas RP como: estereolitografía (SLA), deposición por hilo fundido (FDM), sinterización selectiva por láser (SLS) y fabricación por corte y laminado (LOM). Se analizan las ventajas y desventajas de cada método como: tiempo de fabricación, materiales, costo, exactitud. Como resultado se tiene que se produce una mejor exactitud del modelo en silicón de la prótesis utilizando el método de estereolitografía para la fabricación del molde, una de las razones es que el silicón es capaz de capturar los detalles del molde con lo que se obtiene una superficie suave al tacto, además tiene un costo menor y el proceso es relativamente rápido (2.5 horas). Se utiliza un escáner láser para capturar la nube de puntos de forma rápida y sin el temor de perder detalles de la superficie, lo que permite un ahorro en tiempo significativo. Por otro lado, Hieu *et al.* 2003, desarrollaron implantes para pacientes con tumores en la mandíbula utilizando técnicas como RE y RP para la reconstrucción del defecto maxilofacial. También utilizan técnicas de escaneo tridimensional como la tomografía computarizada (CT) para el diagnóstico, reconstrucción de modelos CAD y la planeación quirúrgica.

Un procedimiento para la fabricación de réplicas físicas de huesos, prótesis y guías basado en sistemas CAD/CAM y RP fue propuesto por (Ciocca *et al.* 2009). En este trabajo se evalúa el tiempo de producción de una mandíbula de cerdo con un defecto y el costo de los materiales utilizados, para determinar el impacto económico de estos procedimientos. Como resultados se obtuvo un tiempo total de modelado 3D de 8 hrs, un tiempo de fabricación de 27 horas utilizando un equipo Rapidform XOS2, y un costo del material de \$70 USD incluyendo la fabricación de la mandíbula sana y la mandíbula con defecto.

Entre las ventajas de este método se encuentra la exactitud alcanzada en la fabricación del implante, teniendo una desviación máxima de 1.18 mm en el área de corte entre la mandíbula y el implante.

Algunos elementos principales que se deben tomar en cuenta para la fabricación de modelos médicos son (Gibson *et al.* 2006): velocidad, costo, exactitud, materiales, y facilidad de uso de la tecnología. Aunque no existe duda que los modelos médicos son de gran ayuda para resolver problemas quirúrgicos complejos, aún existen numerosas deficiencias en las tecnologías RP usada para generar los modelos. Parte de esta razón es porque el equipo RP fue diseñado originalmente para resolver problemas en el área de manufactura de productos y no específicamente para resolver problemas médicos. El desarrollo de las tecnologías RP ha sido enfocado a mejoras que se adaptan a la ingeniería en lugar de la medicina. Por tanto, es importante estudiar las diferentes máquinas RP existentes en el mercado con el propósito de determinar cuál es la más conveniente para la fabricación de modelos médicos según las necesidades (Gibson *et al.* 2006).

A pesar de todo el desarrollo logrado sobre el uso de tecnologías modernas de la ingeniería en el diseño y fabricación de prótesis e implantes, su aplicación esta aún limitada en muchos hospitales.

Existen dos razones principales que dificultan el uso de estas tecnologías dentro de los hospitales. Primero, las tecnologías requieren un trabajo multidisciplinario, ingenieros y médicos deben estar bien preparados, no solo en el diseño y la manufactura, también en el campo de biomateriales, procesamiento de imágenes médicas y medicina.

Este recurso humano no está siempre disponible en los hospitales. Segundo, el costo en el tratamiento es caro; y no es conveniente cambiar los procedimientos tradicionales por los nuevos. Por otro lado, con el objetivo de transferir las aplicaciones médicas a los hospitales con éxito, se requiere:

1. Una relación estrecha de colaboración entre médicos e ingenieros, dispuestos a compartir conocimiento y experiencias; así como estimular nuevas aplicaciones médicas.
2. El desarrollo de procedimientos nuevos para proveer soluciones que mejoren la calidad en el diagnóstico y tratamiento. Concretamente se deben mejorar las habilidades del cirujano, minimizar el tiempo y la complejidad de la operación, e incrementar la seguridad para los pacientes.

El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de nuevos procedimientos para el diseño de prótesis e implantes faciales.

Método tradicional

La técnica tradicionalmente utilizada para la fabricación de prótesis faciales es el método artesanal, el cual requiere de la experiencia, habilidad y tiempo del especialista.

En este método la calidad y el acabado de la prótesis dependen de la habilidad manual del cirujano.

Los pasos principales para la fabricación de una prótesis o implante facial pueden variar dependiendo del tipo de deformidad facial, sin embargo varios pasos son comunes a todos los tipos de deformidades.

Para el caso de prótesis auriculares el método tradicional se describe a continuación.

Impresión de oreja sana

El primer paso consiste en tomar la impresión de la oreja sana del paciente para obtener el modelo maestro de trabajo. Se aplica previamente vaselina sobre el cabello para evitar que se adhiera al material de impresión. Se utiliza material de impresión tipo hidrocoloide irreversible (alginato) y se coloca sobre la oreja sana del paciente. Encima del alginato se coloca una gasa para contener el material sin que se corra y encima de esta se coloca una gasa enyesada para darle a la impresión soporte sin que se desgarre o deforme al momento de retirarla. Se espera aproximadamente 10 min a que fragüe el material, después de los cuales se retira la impresión del paciente. Posteriormente se corre la impresión obtenida en yeso tipo III y cuando este hubo fraguado se retira el material de impresión. De esta forma se obtiene el modelo positivo de la oreja sana del paciente. En la Figura 1 se ilustra este procedimiento.

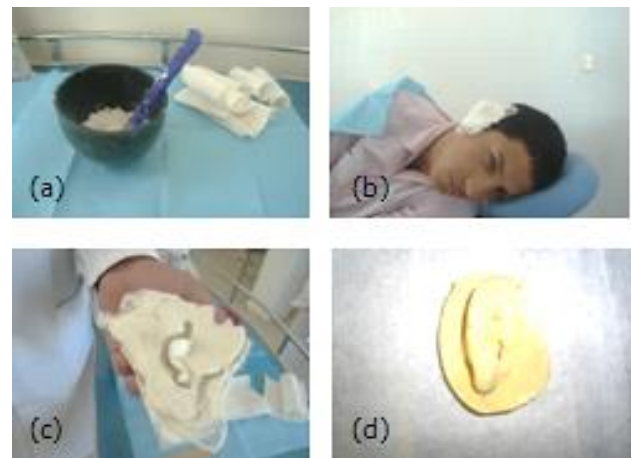


Figura 1 Impresión de oreja sana: (a) alginato y gasas de yeso utilizadas para tomar la impresión de la oreja sana del paciente, (b) mezcla de alginato y agua que se colocan en la oreja sana del paciente, (c) se retira la impresión del paciente, (d) se corre la impresión obtenida en yeso tipo III

Impresión de base auricular

En este paso es importante conocer la ubicación del conducto auditivo y tomar la impresión del área donde la prótesis va a ser colocada. Con este fin el especialista coloca un arco facial para conocer la ubicación del conducto auditivo en la oreja remanente y coloca una marca con lápiz demográfico.

Se toma la impresión con hidrocoloide irreversible (alginato) y queda la huella donde se ubica el conducto auditivo, esto sirve como referencia para colocar la prótesis auricular que debe tener el mismo nivel en relación al lado opuesto (Chua *et al.* 2000, Jankielewicz *et al.* 2003). Al igual que en el paso anterior se corre esta impresión en yeso tipo III y de esta manera se obtiene la base sobre la cual se va a modelar la oreja en cera rosa. El procedimiento se muestra en la Figura 2.

Modelado de la oreja

El siguiente paso consiste en modelar en cera rosa “toda estación” la oreja faltante (Figura 3), tomando como base el modelo en yeso de la oreja sana. En el modelado se debe considerar la forma, peculiaridades y características de la oreja sana del paciente. Toda esta caracterización se verifica frecuentemente colocando el modelo de cera en la cara del paciente (Chua *et al.* 2000, Garita *et al.* 2008). Las técnicas de escultura o modelado que se utilizan en las prótesis auriculares son:

- Copia invertida de la oreja opuesta faltante.
- Uso del negativo de la fotografía invertida.
- Colocación del modelo de la oreja faltante o foto del perfil del paciente (área sana) frente a un espejo.
- Transferencia sobre papel celofán.
- Uso del pantógrafo espacial inversor.

- Uso de modelos de stock.
- Obtención del modelo del pabellón auricular del paciente antes de la cirugía.



Figura 2 Impresión de base auricular: (a) el especialista coloca el arco facial en el paciente para conocer la ubicación del conducto auditivo en la oreja remanente, (b) se marca con un lápiz demográfico, (c) al momento de tomar la impresión con hidrocoloide irreversible (alginato) queda la huella donde se ubica el conducto auditivo

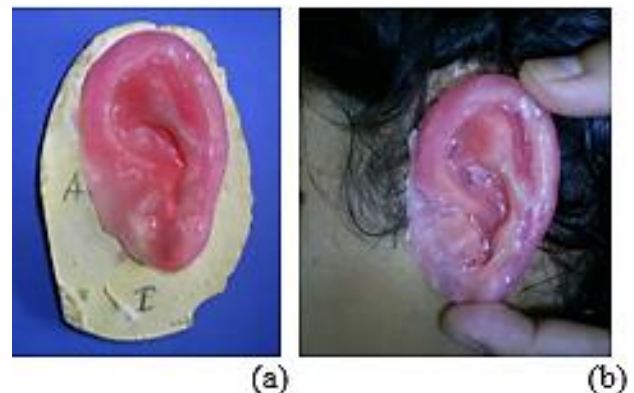


Figura 3 Modelado de la oreja: (a) modelo en cera rosa “toda estación” de la oreja faltante, (b) verificación en el paciente

Fabricación de molde

A partir del modelo en cera se realiza el enmuflado de la prótesis. Para ello se utiliza una mufla de prostodoncia y yeso tipo III (piedra) para la base de la mufla.

Cuando el yeso ha fraguado se colocan dos capas de separador para proceder a colocar la contra mufla y agregar yeso tipo IV (Garita *et al.* 2008). La Figura 4a muestra la mufla de una prótesis auricular.

Cuando el yeso de la mufla ha fraguado se coloca en una olla con agua caliente a 100° centígrados por 15 min (proceso conocido como de “cera perdida”). Posteriormente se abre la mufla para lavar y remover la cera que ahora es líquida. Se agrega más agua caliente con detergente en polvo, tallando las dos contrapartes de la mufla con un cepillo de cerdas de plástico, esto para evitar que se queden restos de cera y grasa en el yeso (Garita *et al.* 2008).

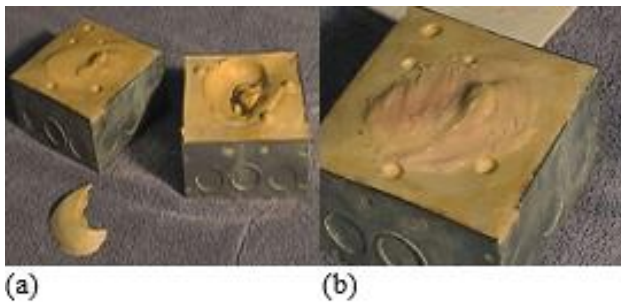


Figura 4 Fabricación de la prótesis: (a) molde, (b) moldeo de la prótesis

Fabricación de la prótesis

El especialista lleva a cabo la caracterización del silicón grado médico utilizando fibras “flock” (fibras textiles), esto con el objetivo de que el silicón tenga la misma tonalidad que la piel del paciente, Figura 4b.

Se coloca el silicón en la mufla con una espátula fina. Finalizando este procedimiento, se cierra la mufla uniendo las dos contrapartes y se lleva a una prensa hidráulica con una fuerza de presión de 400 Kg. y se deja vulcanizar por 24 horas (Garita *et al.* 2008).

Caracterización final

Después que el silicón ha fraguado se rescata de la mufla y comienza la caracterización extrínseca de la prótesis con pinturas al óleo y pinceles de diferentes grosores según el área a caracterizar. El objetivo es dar detalles en cuanto al color de la piel del paciente así como manchas, pecas, cicatrices u oscurecimientos de áreas específicas. Finalmente cuando el color de la prótesis es satisfactorio se coloca una capa de silicón grado médico, esto con el fin de sellar el color colocado y evitar que se borre con facilidad (Garita *et al.* 2008).

Como se puede observar este procedimiento tradicional es muy artesanal, dependiendo en gran medida de la habilidad y experiencia del especialista.

Método propuesto asistido por la ingeniería

Con base al análisis del método tradicional y tomando en cuenta las técnicas de diseño y fabricación modernas de la ingeniería, se propone una nueva metodología para asistir el diseño y fabricación de prótesis. La metodología propuesta se muestra en la Figura 5, y consta de las siguientes etapas generales:

1. Información del paciente. Obtención de información digital del paciente por medio de imágenes médicas CT, MR y/o escaneo 3D.
2. Procesamiento de imágenes médicas. Procesamiento de los datos del paciente con el propósito de generar los modelos anatómicos tridimensionales (modelos CAD) correspondientes.
3. Modelado anatómico. Diseño del implante o prótesis mediante un sistema CAD en el cual se puedan realizar operaciones de reconstrucción y diseño de modelos anatómicos.
4. Fabricación rápida. Fabricación rápida del modelo o molde anatómico utilizando técnicas de manufactura y/o prototipado rápido.

5. Post-procesamiento. Post-procesamiento del modelo anatómico fabricado con el propósito de generar el implante o prótesis final de acuerdo a los materiales y características considerados en el diseño en particular.



Figura 5 Método asistido por la ingeniería para el diseño y fabricación de prótesis

Cabe hacer mención que la gran mayoría de los implantes faciales no tienen un propósito funcional, sino que son para fines estéticos o apariencia. Por lo tanto, se trata de modelar o fabricar formas externas sin importar la constitución interna de la parte anatómica.

Caso de estudio

Para analizar y evaluar el método propuesto, se consideró el desarrollo de un caso de estudio correspondiente al diseño y fabricación de una prótesis auricular para un paciente masculino de 20 años de edad, originario y residente de San Luis Potosí, S.L.P., soltero, con escolaridad de secundaria terminada, y empleado en la industria como soldador.

El paciente presenta pérdida total del pabellón auricular en el lado izquierdo y se pretende colocar una prótesis auricular, ver Figura 6.



Figura 6 Paciente joven con pérdida total del pabellón auricular izquierdo

La metodología utilizada para este caso de estudio se muestra en la Figura 7, la cual fue definida con base al método propuesto asistido por la ingeniería. Cabe hacer mención que esta metodología no está limitada a los equipos, software o materiales utilizados en el presente caso de estudio.

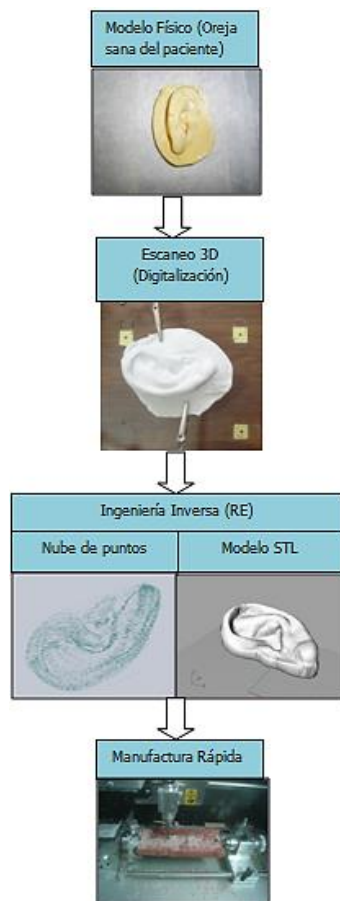


Figura 7 Método asistido por la ingeniería para el diseño y fabricación de una prótesis auricular

Modelo físico

El primer paso es la obtención del modelo físico del paciente utilizando un procedimiento similar al utilizado en el método tradicional. Una de las razones por las cuales se propone el uso de un modelo físico rígido de la oreja, es debido a que la oreja es tejido blando, el cual puede deformarse al estar en contacto con algún objeto, como el caso de un palpador o punta del escáner 3D. Por esta razón y para evitar errores geométricos, se propone el uso de un modelo sólido de la oreja sana. También es importante resaltar que no todos los pacientes pueden ser considerados para la colocación de prótesis, en algunos casos extremos tales como quemaduras faciales se deben elegir otros métodos como la cirugía plástica.

Escaneo 3D

Para pasar de un modelo físico a un modelo digital se procede a la digitalización del modelo físico mediante un escáner 3D. Con el propósito de aumentar la precisión y disminuir el ruido en el proceso de digitalización, se propone el uso de un escáner 3D del tipo contacto.

En el presente trabajo se utilizó un escáner MicroScribe G2X, Figura 8a y 8b. Para realizar la digitalización del modelo físico se realiza un barrido utilizando la herramienta Scan Planes, del software MicroScribeUtility del escáner, en la cual se divide el área de trabajo en planos paralelos virtuales y cada vez que la punta del escáner pasa por uno de estos planos virtuales se capturan las coordenadas de un punto.

Una vez capturados los datos se abren en SolidWorks® utilizando la herramienta ScanTo3D, como se muestra en la figura 8c.

Ingeniería Inversa (RE)

El siguiente paso comprende el análisis y manipulación CAD de la información obtenida del escaneo 3D (nube de puntos), proceso conocido como ingeniería inversa (RE).

El propósito de este paso es la obtención del modelo CAD de la oreja faltante. En los últimos años se han desarrollado diversos software para llevar a cabo la RE y desarrollar nuevos productos, entre ellos destacan Catia, Copycad, Geomagic Studio, Imageware, Rapidform, Freeform, Rhinoceros, SolidWorks, etc. Cada paquete CAD posee fortalezas y limitaciones. Algunos superan las operaciones CAD, mientras otros tienen características adicionales que les permiten llevar a cabo otras operaciones tales como editar la nube de puntos y soportar la conversión a formato STL.

Cualquiera de este software puede ser utilizado para llevar a cabo el proceso RE de la prótesis. En el caso particular de este trabajo se utilizó Solidworks por sus capacidades CAD y manejo de la nube de puntos, y Rhinoceros por su capacidad de manejo de modelos de superficies y su conversión a modelos sólidos 3D y formato STL.

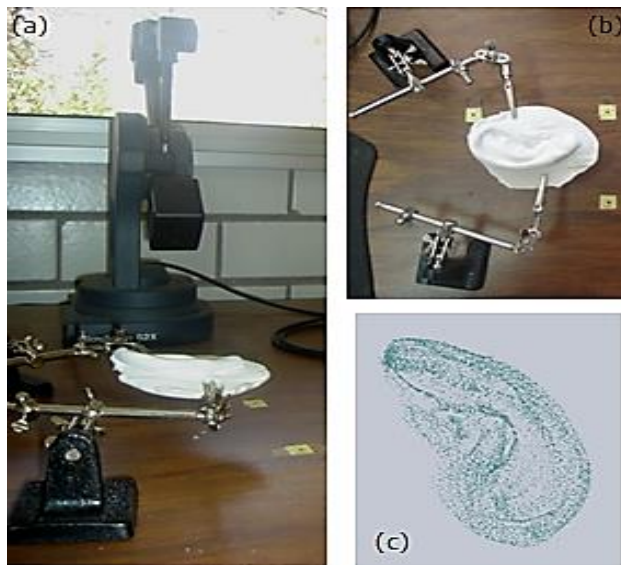


Figura 8 (a) y (b) escáner MicroScribe G2X con la impresión de la oreja sana del paciente obtenida en yeso, (c) nube de puntos en SolidWorks utilizando la herramienta ScanTo3D

En general el proceso RE utilizando la herramienta ScanTo3D de SolidWorks® consta de los siguientes pasos principales (Xiuzi *et al.* 2008):

1. Importar los datos escaneados en forma de nube de puntos o mallas.
2. Pre-procesamiento de los datos importados, incluyendo simplificación, remover ruido y suavizar la superficie.
3. Crear una malla a partir de la nube de puntos. La creación de la malla implica el pre-procesamiento de la malla, la reparación de la topología y el rellenado de agujeros.
4. Crear superficies basadas en la malla, utilizando la creación automática de superficies.

5. Exportar las superficies reconstruidas a un sistema CAD para manipularlas, crear otras características y terminar los detalles del modelo.

El pre-procesamiento o limpieza de los datos escaneados es muy importante debido a que las superficies reconstruidas están basadas en la malla del modelo. El pre-procesamiento de la nube de puntos incluye: eliminación de ruido, remoción de datos extraños y la simplificación. La Figura 9 muestra en forma esquemática el pre-procesamiento de los datos de la nube de puntos.

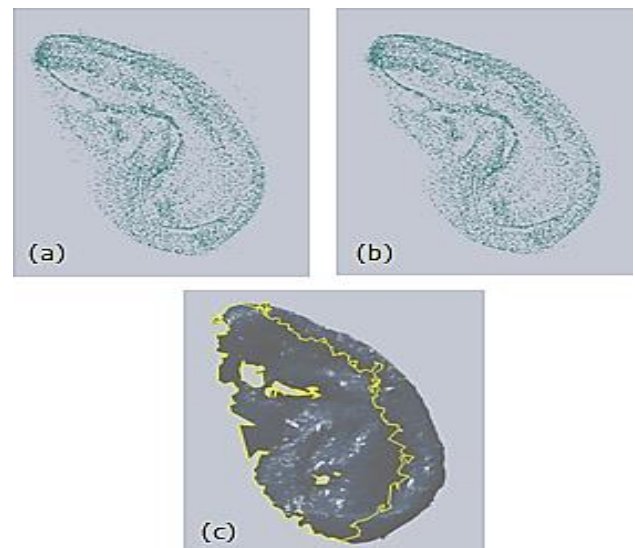


Figura 9 Pre-procesamiento de datos: (a) tamaño original de la nube de puntos: 8718, (b) tamaño final de la nube de puntos: 8072, después de la eliminación del ruido y simplificación, (c) mallado de la nube de puntos

El pre-procesamiento de la malla es más complicado. Éste incluye alineación y registro de múltiples piezas de la malla, simplificación, suavizado, reparación y rellenado de agujeros.

La Figura 10 muestra los pasos principales del pre-procesamiento de la malla.

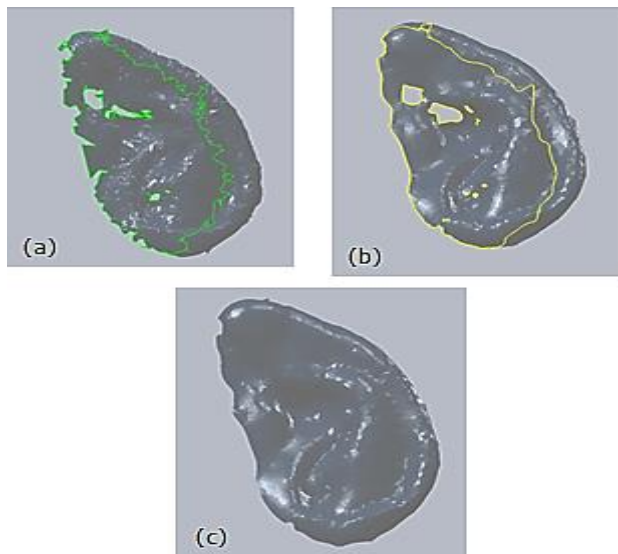


Figura 10 (a) malla original, (b) malla después de la simplificación y el suavizado, (c) malla después de llenar agujeros

Con la nube de puntos se ha creado una superficie 3D abierta de la oreja. Sin embargo, es necesario generar un sólido CAD con el propósito de convertirlo a un formato STL para ser utilizado en los sistemas RM.

Para ello se utiliza la herramienta de superficies de SolidWorks® que permite crear superficies cerradas.

En primer lugar se debe crear un plano paralelo a la superficie de la oreja y sobre este plano se traza la forma de la base. Posteriormente este plano se divide utilizando la función líneas de partición, como se muestra en la Figura 11a.

A continuación se conectan los dos conjuntos de superficies utilizando la función recubrimiento y rellenado de superficies, como se muestra en la Figura 11b, obteniéndose así una superficie cerrada.

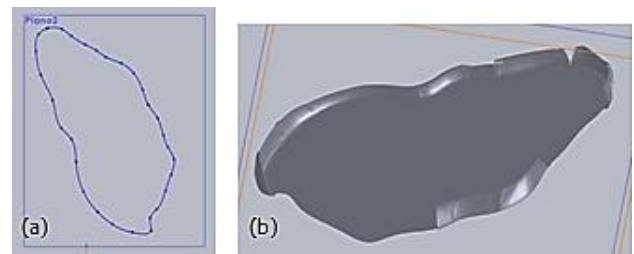


Figura 11 Creación de superficies cerradas: (a) superficie con la forma del contorno de la oreja, (b) superficie cerrada

Una vez obtenida la superficie cerrada de la oreja sana, se utiliza la función espejo para invertirla y de esta manera obtener la oreja faltante del paciente, como se muestra en la Figura 12a. Finalmente se exporta el archivo CAD a Rhinoceros® en donde se convierte a un modelo sólido para poderlo transformar a un formato STL compatible con los sistemas de manufactura rápida, ver figura 12b.

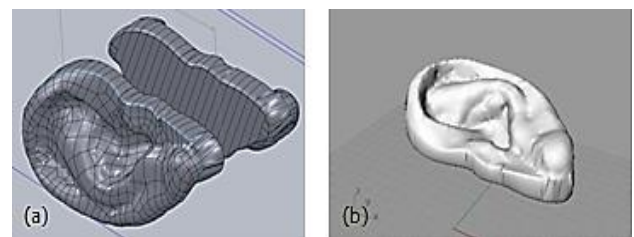


Figura 12 (a) Utilizando la función espejo se obtiene la oreja faltante que necesita el paciente, (b) se exporta el archivo a Rhinoceros 4.0 para convertirlo a un modelo sólido y transformarlo al formato STL

Manufactura rápida (RM)

Posterior a la obtención del modelo STL de la oreja faltante, se procede a la fabricación de la oreja utilizando un sistema de prototipado o manufactura rápida. Existe una gran variedad de sistemas RP&M en el mercado, la mayoría utilizan un proceso aditivo en el cual la pieza se va creando capa por capa utilizando un material específico. Cualquiera de estos sistemas se puede utilizar para fabricar la oreja, sin embargo existen limitantes ya que solo pueden utilizar ciertos materiales en particular.

En el caso del presente trabajo se utilizó un sistema Roland MDX40A debido a que ofrece la ventaja de utilizar diversos tipos de materiales, como la cera rosa, y además era el único sistema que se tenía disponible. El sistema Roland utiliza una técnica de remoción de material capa por capa de la pieza de trabajo (Medellín & Pedraza 2009).

Para la fabricación de la oreja faltante del paciente, originalmente se contemplaron tres opciones:

1. Fabricación directa de la oreja faltante en silicón grado médico.
2. Fabricación de un molde con la forma de la oreja faltante;
3. Fabricación de la oreja faltante en cera rosa “toda estación”.

La primera opción se descartó debido a que la prótesis final de la oreja debe contar con una base de acuerdo a la forma particular donde se ubica el conducto auditivo remanente del paciente, esto para que pueda embonar al momento de colocar la prótesis. El modelo en cera es por lo general moldeado sobre esta base por el cirujano antes de la fabricación en silicón. Adicionalmente, el color y la textura de la oreja deben coincidir con las características del paciente. Tomando estos factores en consideración se determinó que no es factible fabricar la prótesis auricular directamente en el silicón grado médico.

Debido a que la geometría de la oreja es muy complicada (se tienen zonas de difícil acceso, cavidades casi cerradas y muchas irregularidades), la fabricación del molde se vuelve una tarea compleja y laboriosa, teniendo como resultado en muchos de los casos un molde complejo, poco práctico y con problemas de interferencia que evitan el desmolde de la pieza.

Por lo anterior, la segunda opción también fue descartada. Finalmente la opción tres fue considerada como la opción más viable debido a que considera la fabricación del modelo en cera de la oreja faltante. De esta manera se permite que el especialista pueda moldear posteriormente la base de la oreja de acuerdo al conducto auditivo y forma de la cabeza del paciente. El proceso de manufactura rápida de la oreja comienza importando el archivo STL al programa SRP Player® del sistema Roland, como se muestra en la Figura 13. Este software divide al modelo STL en capas (como comúnmente se hace en los sistemas RM y RP), creando de manera automática las trayectorias de la herramienta.

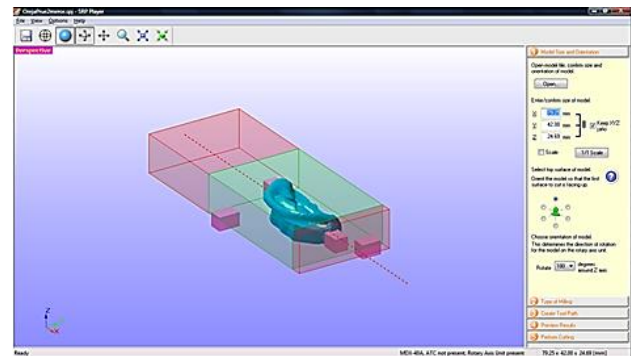


Figura 13 Programa SRP Player que muestra el archivo STL importado

El procedimiento general en el software SRP Player® para la fabricación rápida de la oreja en el sistema Roland es:

1. Definir el tamaño y la orientación del modelo.
2. Seleccionar el método de corte y colocar soportes al modelo.
3. Definir el tipo de material y el tamaño del stock.
4. Generar las trayectorias de la herramienta.
5. Vista previa de los resultados.
6. Corte de la pieza.

La Figura 14a muestra los resultados de la visualización previa del modelo antes de su fabricación, la Figura 14b muestra el trabajo de la máquina Roland MDX 40A sobre el stock de cera rosa, y la Figura 14c muestra el modelo en cera terminado.

Fabricación del molde y prótesis final

El especialista realiza el moldeo de la base del modelo en cera sobre la base del cráneo donde planea colocar la prótesis, Figura 15. Cuando se tiene listo el modelo en cera, se fabrica el molde de la prótesis siguiendo el proceso tradicional conocido como cera perdida, el cual se mencionó en el método tradicional (sección 3). A partir de este paso se unen ambos métodos (tradicional y propuesto) para lograr fabricar una prótesis auricular utilizando las tecnologías modernas de la Ingeniería Inversa.

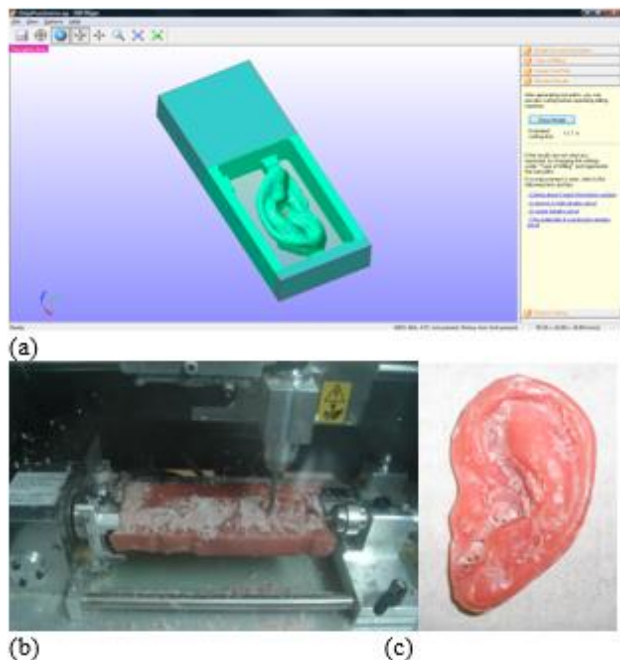


Figura 14 Fabricación rápida del modelo: (a) vista preliminar, (b) corte en la máquina Roland MDX 40A, y (c) modelo final en cera

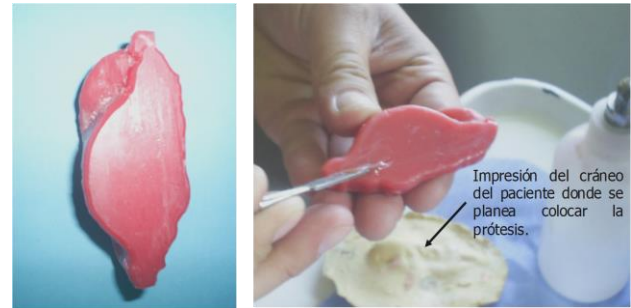


Figura 15 Moldeo de la base del modelo en cera sobre la impresión del cráneo del paciente

Evaluación y discusión

De los resultados obtenidos del desarrollo del caso de estudio se generaron las observaciones que se describen en los siguientes párrafos. Las ventajas de usar las técnicas modernas de la ingeniería en la fabricación de prótesis auriculares son:

- La calidad, geometría y acabado de la prótesis no dependen de la habilidad y experiencia del especialista.
- El modelo de la oreja faltante puede ser obtenido de manera muy precisa a partir de la oreja sana del paciente, esto mediante la ingeniería inversa y la función espejo de los sistemas CAD.
- Los requerimientos en cuanto a precisión y exactitud en aplicaciones médicas relacionadas a las prótesis faciales permiten el uso de sistemas de escaneo 3D.

Dentro de las desventajas que se tienen con el uso de las técnicas modernas de la ingeniería se pueden mencionar las siguientes:

– El tiempo de fabricación del modelo en cera en el método propuesto, es mayor comparado contra el tiempo requerido en el método tradicional. El especialista tarda un tiempo aproximado de 13 horas en fabricar el modelo en cera, mientras que utilizando las técnicas de RE y RM se requieren aproximadamente 34 horas, de las cuales 12 son horas hombre (diseñador) y 22 horas máquina. Sin embargo el costo por hora de un cirujano especialista puede ser mayor que el costo por hora del diseñador y uso de los sistemas RM.

– Las técnicas RE y RM aplicadas a la medicina requieren un grupo multidisciplinario. Adicionalmente se requiere contar con los equipos necesarios como el escáner 3D, el software RE y CAD, así como un sistema de manufactura rápida.

Por lo anterior, se puede decir que la integración de las técnicas modernas de la ingeniería permite mejorar la calidad y precisión de las prótesis faciales pero con un tiempo y costo más elevado debido a los dispositivos y grupo de trabajo requeridos. Sin embargo, estos tiempos y costos pueden llegar a reducirse en la medida en que el uso de dichas técnicas sea más común en la medicina y los costos de los equipos disminuyan.

El uso de bases de datos de modelos digitales anatómicos puede reducir o eliminar el proceso de digitalización, RE y diseño, reduciendo el costo total de la prótesis. Adicionalmente, el uso de sistemas de fabricación rápida de mayor capacidad puede reducir el tiempo y costo de fabricación promedio ya que se pueden producir varias piezas (prótesis) en una sola corrida de la máquina, producción en lotes.

En el caso de prótesis faciales, como el caso de una prótesis de oreja, el uso de las técnicas modernas de la ingeniería puede resultar en una capacidad tecnológica sobrada.

Sin embargo, su uso se vuelve importante cuando se trata de prótesis o implantes internos para la reconstrucción de hueso debido a enfermedades o traumas, así como para la planeación quirúrgica, en donde la precisión del implante o prótesis es de vital importancia. En estos casos, la precisión lograda con las técnicas modernas de la ingeniería puede conducir a un diagnóstico más preciso, una planeación más fácil del tratamiento, una planeación quirúrgica más eficiente, una reducción del tiempo en quirófano, y un tiempo de rehabilitación y recuperación más corto.

Finalmente es importante mencionar que la metodología propuesta para el diseño de prótesis e implantes faciales es general y debe ser adaptada para cada caso particular, tal como se realizó en el caso de estudio desarrollado. Adicionalmente los equipos y dispositivos utilizados pueden no están limitados a los mencionados en este trabajo.

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto y evaluado una nueva metodología para el diseño y fabricación de prótesis e implantes faciales basada en el uso de tecnologías modernas de la ingeniería. El método propuesto considera el uso de las tecnologías de la ingeniería en las etapas de digitalización, diseño y fabricación de la prótesis o implante, reduciendo las desventajas del proceso tradicional de modelado manual. Los resultados de la evaluación demuestran que el método propuesto incrementa la calidad y precisión dimensional de la prótesis o implante; sin embargo el costo y tiempo de fabricación son más elevados debido a los dispositivos y grupo de trabajo requeridos.

Como trabajo futuro se contempla el análisis de otros casos de estudio considerando diferentes tipos de prótesis o implantes faciales.

Agradecimientos

Al PROMEP (SEP) y al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para la realización del proyecto, No. de proyecto: CB-2010-01-154430.

Referencias

- Chua Chee Kai, Chou Siaw Meng, Lin Sin Ching, Lee Seng Teik, Saw Chit Aung (2000). Facial prosthetic model fabrication using rapid prototyping tools. *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 11, Issue 1, pp. 42 – 53.
- Ciocca L., De Crescenzo F., Fantini M., Scotti R. (2009). CAD/CAM and rapid prototyped scaffold construction for bone regenerative medicine and surgical transfer of virtual planning: A pilot study. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 33, pp. 58 – 62.
- Garita Medrano Elizabeth, González Cardín Vicente, Galicia Arias Araceli (2008). Rehabilitación protésica de órbita implanto soportada en un paciente con secuela de médula epiteloma teratoide maligno. *Cancerología*, Vol. 3, pp. 77-87.
- Gibson I., Cheung L.K., Chow S.P., Cheung W.L., Beh S.L., Savalani M., Lee S.H. (2006). The use of rapid prototyping to assist medical applications. *Rapid Prototyping journal*, Vol. 12, Issue 1, pp. 53-58.
- Hieu L.C., Zlatov N., Vander Sloten J., Bohez E., Khanh L., Binh P.H., Oris P., Toshev Y. (2005). Medical rapid prototyping applications and methods. *Assembly Automation*, Vol. 25, Issue 4, pp. 284–292.
- Hieu L.C., Bohez E., Vander Sloten J., Phien H.N., Vatcharaporn E., Binh P.H., An P.V., Oris P. (2003). Design for medical rapid prototyping of cranioplasty implants. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 175 – 186.
- Jankielewicz Isabel y co-autores (2003). *Prótesis Buco – Maxilo – Facial*, Editorial Quintessence, S.L. Barcelona, Spain.
- Kermer C., Rasse M., Lagogiannis G., Undt G., Wagner A., and Millesi W. (1998). Colour stereolithography for planning complex maxillofacial tumor surgery. *Journal of cranio-maxillofacial tumor surgery*, Vol. 26, pp. 360-2.
- Lohfeld S., McHugh P., Serban D., Boyle D., O'Donnell G., Peckitt N. (2007). Engineering Assisted Surgery: A route for digital design and manufacturing of customised maxillofacial implants. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp. 333 – 338.
- Medellín-Castillo Hugo I., Pedraza Torres Joel Esau (2009). Rapid Prototyping and Manufacturing: A Review of Current Technologies. *Proceedings of the 2009 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)*, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- Popat A.H. (1998). Rapid prototyping and medical modelling. *Phidias – EC funded Network Project on Rapid Prototyping in Medicine*, Vol. 1, pp. 10-12.
- Xiuzi Ye, Hongzheng Liu, Lei Chen, Zhiyang Chen, Xiang Pan, Sanyuan Zhang (2008). Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-Aided Design*, Vol. 40, pp. 812 – 827.