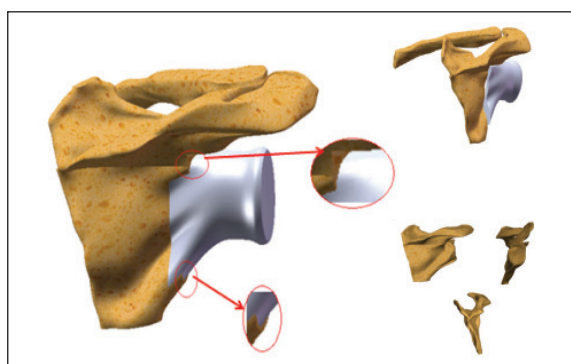


Parametrización de la articulación Gleno-Humeral



Alberto Higuera-Garrido *
Pablo Pando-Cerra *
Aquilino Osorio-Zapico *
Rosa María Verónica López-Vega*

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero de Minas
Ingeniero Industrial

* Universidad de Oviedo. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación.
Campus de Viesques, 33204 - 33204 Gijón. Tfno: +34 985 181948. higueraalberto@uniovi.es, pandopablo@uniovi.es, aosorio@uniovi.es, verovega@gmail.com

Recibido: 23/08/2010 • Aceptado: 15/11/2010

Parameterization of the Gleno-Humeral joint

ABSTRACT

• Introduction.

The aim of this project involves the parameterization of the gleno-humeral joint in a fast and simple way and so as to reduce waiting times, irradiation of patients and costs for the different health systems, both public and private. Also the aim involves to provide surgeons and engineers with more efficient tools at the time of diagnosis, surgery and implant design.

Material and Methods.

A stereolithographic reconstruction of the joint is processed into a featured model (coatings, extrusions, sweeps, etc.) prior to the parameterization of those features that define the joint. By consulting documentation and expert surgeons, those parameters of interest for the generation of the 3D model are determined and then implemented in the model. Following the parameterization of the model in the mechanical design software application Solidworks® it is necessary to check the results and to validate the model.

Results.

An Excel® file is obtained that allows, from a number of data, automatically to generate the reconstruction of the patient's joint in seconds with Solidworks® from which the engineer can make or evaluate the mechanical design of the implant and the surgeon study those parameters of interest. Finally a parametric model of the gleno-humeral joint is obtained which responds correctly to the Excel® sheet that monitors it.

Conclusions.

By eight parameters it is possible to satisfactorily characterize the gleno-humeral joint for diagnostic, pre and post-surgical studies.

Varying the values of the parameters in an Excel® sheet anatomy is automatically rebuilt in a 3D mechanical design application (Solidworks®).

Without the time and resource requirements of typical 3D reconstructions significantly satisfactory results are obtained and the obtained parametric model responds correctly to changes in the values of the parameters of government.

- **KEYWORDS:** gleno-humeral joint, custom made implant, parameterization, glenoid fossa, mechanical design, 3D reconstruction.

RESUMEN

Introducción.

El objetivo del presente proyecto consiste en la parametrización de la articulación gleno-humeral de una manera rápida y sencilla que permita reducir los tiempos de espera y la irradiación de los pacientes, así como los costes a los diferentes sistemas sanitarios, tanto públicos como privados.

Igualmente se pretende dotar a cirujanos e ingenieros de herramientas más eficientes a la hora del diagnóstico, cirugía y diseño de implantes.

Material y Métodos.

A partir de una reconstrucción estereolitográfica de la articulación se procede a su transformación en modelo de operaciones (recubrimientos, extrusiones, barridos, etc.) previamente a la parametrización de aquellas que definen la articulación.

Mediante la consulta de documentación y el asesoramiento de expertos cirujanos se determinan aquellos parámetros de interés para la generación del modelo 3D y se procede a su implementación en el modelo.

Tras la parametrización del modelo en la aplicación de diseño mecánico Solidworks® se procede a la comprobación de los resultados y a la validación del mismo.

Resultados.

Se obtiene una hoja Excel® que permite, a partir de un número de datos, generar automáticamente en segundos la reconstrucción de la articulación del paciente en la aplicación *Solidworks®* desde la que el ingeniero puede realizar o valorar el diseño mecánico del implante y el cirujano estudiar aquellos parámetros de interés.

Igualmente se obtiene un modelo paramétrico de la articulación gleno-humeral que responde correctamente a la hoja de Excel® que lo gobierna.

Conclusiones.

Mediante ocho parámetros es posible caracterizar la articulación gleno-humeral de una manera satisfactoria para estudios diagnósticos, pre y post-quirúrgicos.

Variando los valores de los parámetros en una hoja de Excel® se reconstruye automáticamente la anatomía en una aplicación de diseño mecánico 3D (*Solidworks®*).

Sin los requerimientos de tiempo y recursos de las reconstrucciones 3D habituales se obtienen resultados significativamente satisfactorios y el modelo paramétrico presentado responde correctamente a la variación en los valores de sus parámetros de gobierno.

Palabras clave: articulación gleno-humeral, implante a medida, parametrización, glena, diseño mecánico, reconstrucción 3D.

1. INTRODUCCIÓN

La cirugía protésica del hombro se inició en los Estados Unidos para tratar las fracturas severas de la articulación gleno-humeral (Ali, et al, 2010). Con los años, este tratamiento se ha utilizado para otros procesos con mayor éxito que las fracturas, como la artrosis primaria (Hattrup, 2009), artrosis post traumática, artrosis por rotura masiva del manguito de los rotadores, artritis reumatoide, necrosis avascular, etc. Desafortunadamente, todos estos procesos conducen a la pérdida del cartilago y al deterioro mecánico de la articulación. El resultado es la aparición de dolor y la rigidez articular. Esto comporta una pérdida de fuerza, una disminución del movimiento de la articulación y el deterioro de la función.

La articulación gleno-humeral (hombro) presenta una mayor complejidad que la articulación femoroacetabular (cadera) si bien mantienen ciertos conceptos comunes (Fig. 1). Ambas consisten en una superficie relativamente cóncava en la que articula una superficie convexa, si bien en el caso del hombro la articulación presenta dos centros de rotación y la superficie convexa (glena) es de menor medida que en la cadera, resultando en una menor coherencia entre glena y cabeza del húmero (Kapandji, 2007).

1.1. ARTROPLASTIA TOTAL Y HEMIARTROPLASTIA

La artroplastia total de la articulación gleno-humeral consiste en sustituir las dos partes de la articulación, es decir,

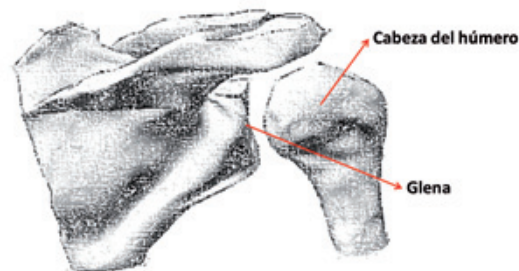


Fig. 1: Articulación gleno-humeral

la cabeza humeral y la glena, por implantes metálicos o plásticos. En cambio, en la hemiartroplastia, sólo se sustituye la cabeza humeral, la glena se reforma o se reconstruye pero no se sustituye.

Dentro de las prótesis totales de la articulación gleno-humeral se pueden establecer diferentes tipos según el grado de congruencia entre la cabeza humeral y la glena: congruentes, semicongruentes e incongruentes.

- Implantes congruentes: su forma es lo más parecida posible a la anatómica. Tienen un componente humeral diseñado para mantener una adecuada fijación e integridad de las inserciones del manguito de los rotadores en el cuello anatómico. Si el manguito de los rotadores se encuentra intacto, no es necesario que el componente de la glena presente una estabilidad intrínseca, pero en general sacrifican la movilidad y potencian la estabilidad aunque a costa de un aumento de las fuerzas de cizallamiento. Fueron los diseños iniciales de prótesis totales. Presentan un gran número de problemas mecánicos: fracturas periarticulares y aflojamientos del componente de la glena.

- Implantes semicongruentes: presentan un mayor recubrimiento del componente humeral con el fin de aumentar la estabilidad articular, y evitar la migración superior del componente humeral por lo que se preserva principalmente para pacientes con disfunción del manguito de los rotadores, siguen presentando grandes sollicitaciones sobre el componente de la glena, por lo que son frecuentes los aflojamientos.

1.2. TIPOS DE PRÓTESIS

- Prótesis total de hombro: Consiste en substituir las superficies articulares por una hemiesfera de metal finamente pulida unida a un vástago en el húmero, y por un receptáculo de polímero en la glena de la escápula. Los componentes tienen varios tamaños para adaptarse a las diferentes morfologías de los huesos. Si el hueso es de buena calidad, se puede utilizar un componente humeral sin cemento, pero si el hueso es porótico, este componente humeral se coloca con cemento ortopédico. En la mayoría de los casos, el componente de plástico de la glena, se implanta con cemento ortopédico pero no se

aconseja esta implantación si hay un buen cartilago, existe un gran defecto óseo o un déficit importante de los tendones del manguito rotador. Los pacientes con artrosis del hombro y los tendones del hombro conservados son buenos candidatos para la prótesis total de hombro.

- Prótesis de recubrimiento: Si el paciente posee un cartilago articular conservado, como en el caso de algunas necrosis avasculares, es necesario solamente el recambio de la superficie articular humeral. Para su colocación es necesaria una cirugía más limitada, lo que a veces la convierte en ideal para el tratamiento de la artrosis en los pacientes muy ancianos.
- Prótesis total invertida: Se utiliza tanto en personas que tienen una artrosis severa por rotura completa inveterada del manguito de los rotadores como una prótesis anterior que ha fracasado. Para estos individuos, una prótesis total convencional de la articulación gleno-humeral puede dejarlos todavía con dolor, con serias dificultades y debilidad para mover el brazo verticalmente más allá de un ángulo de 90°. En la prótesis total invertida se cambia la hemiesfera que sustituye la cabeza humeral por una pieza cóncava de polímero colocándose en la zona de la glena hemiesfera metálica. Esto permite que el paciente utilice el músculo deltoides en vez del manguito de los rotadores para levantar el brazo.

Resulta por todo ello evidente que para la colocación de una prótesis se ha de estudiar cada caso en particular, recogiendo:

- La patología específica de cada paciente.
- Las características particulares de la articulación del paciente.

Por todo ello, es de gran utilidad disponer de un modelo tridimensional, adaptado al paciente (Liverneaux, et al, 2009), para estudiar el posicionamiento de la prótesis.

En la actualidad existen una serie de métodos para el estudio de la articulación gleno-humeral. La mayoría de éstos se basan en la apreciación que el cirujano realiza de imágenes radiológicas bidimensionales con sus consecuentes ventajas e inconvenientes.

1.3. ESTUDIO MEDIANTE RADIOGRAFÍAS

La radiografía es la técnica de diagnóstico por imágenes más usada en la actualidad, gracias, en gran parte, a su bajo coste económico comparada con otras técnicas de imagen médica.

El estudio mediante radiografías presenta una serie de inconvenientes:

- Es un estudio en dos dimensiones (2D), de modo que se dificulta la labor de la toma de medidas. Del mismo modo, se hace más complicado hacer una valoración precisa de la morfología de la articulación, generando incertidumbre en la elección del implante.

- La tendencia diagnóstica se dirige a la reducción de la irradiación del paciente, por ello estas pruebas se limitan en la medida de lo posible. Al ser una radiación acumulativa no es conveniente la continua exposición del paciente.
- Puede producir malformaciones en el feto, sobre todo en los primeros meses de embarazo.

1.4. TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA

La Tomografía Axial Computarizada (TAC) es una técnica de diagnóstico ampliamente utilizada en medicina (Friedman, et al, 1992). Es una variante de la radiografía y se basa en la toma de imágenes radiográficas alrededor de una zona del cuerpo de forma que, mediante la unión e interpretación de los datos obtenidos, se obtiene un corte de la zona a explorar.

Los principales inconvenientes que presenta este método son:

- Relativamente elevado coste económico de la exploración TAC.
- Es necesario un número elevado de cortes tomográficos para obtener una reconstrucción tridimensional precisa, lo que implica exponer al paciente a una considerable dosis de radiación.

2. SISTEMAS DE RECONSTRUCCIÓN TOTAL

El uso de técnicas de reconstrucción tridimensional a partir de imagen médica permite, entre otros, la lectura de estudios TAC y su interpretación espacial, obteniendo un modelo 3D de la estructura objeto de estudio (Fig. 2).

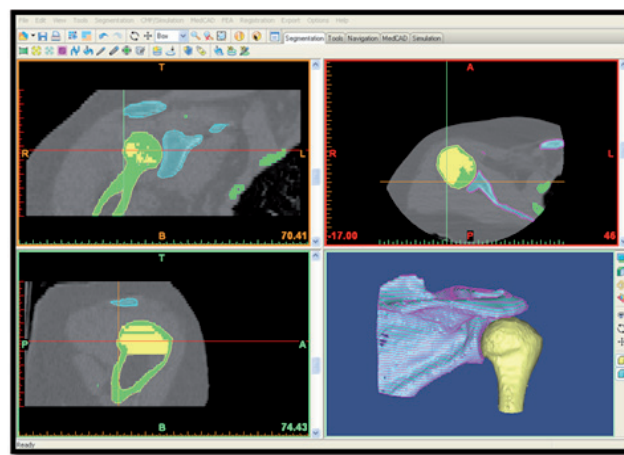


Fig. 2: Reconstrucción de la articulación gleno-humeral mediante el software Mimics®.

Los inconvenientes de esta técnica de reconstrucción 3D consisten en:

- Dificultad en el aislamiento de estructuras óseas y tejidos en aquellos casos catastróficos con presencia de pequeños fragmentos óseos o anatomías con elevada degeneración funcional y morfológica.

- Necesidad de un elevado número de secciones (irradiación del paciente) para obtener reconstrucciones fidedignas de la articulación.

Es por todo esto que el desarrollo de una aplicación que permita la reconstrucción de la articulación gleno-humeral, a partir de una reducida cantidad de datos paramétricos, se presenta como una importante ventaja a la hora de valorar la estabilidad y funcionalidad de la articulación, así como la idoneidad de un tipo y tamaño de implante concreto.

Para determinar aquellos parámetros que determinan las características de la articulación se procede a la documentación y consulta con expertos cirujanos de la Unidad de Hombro del Hospital de Cabueñes en Gijón.

Las relaciones entre el tamaño, la inclinación y la retroversión de la glena son importantes para entender cuando un cirujano prepara la reconstrucción de la glena durante una artroplastia total de hombro. El conocimiento de estos valores y su variación ayudan a reproducir un resultado más anatómico (Churchill, et al, 2001).

La geometría modificada se caracteriza por parámetros como el radio de la cabeza del húmero y la orientación glenoidea (De Leest, et al, 1996). El efecto de un cambio en los parámetros en la fuerza muscular ejercida era pequeña en comparación con la fuerza máxima de un músculo. Sin embargo, en relación con la fuerza de referencia inicial en el músculo, los cambios que tuvieron lugar fueron de un promedio del 50%. Aquellos parámetros relacionados con la retroversión resultaron especialmente importantes, ya que se pueden ocasionar cambios en la fuerza de hasta 300%. Es por ello que la retroversión será uno de los principales parámetros determinantes en la reconstrucción de la articulación.

Así mismo, la inclinación de la glena se ha asociado con la patología del manguito rotador, determinándose que un aumento en la inclinación de la glena puede causar la migración superior de la cabeza del húmero, lo que puede producir la compresión del tendón del supraespinoso (Flieg, et al, 2008).

En los hombros con inestabilidad multidireccional, la traslación de la cabeza del húmero en la glena se incrementa en el rango medio debido a las siguientes tres razones: el aumento de retroversión, un borde posteroinferior hipoplásico y la disminución de la abducción de la escápula durante la elevación del brazo. También se constata que la estabilidad varía en función de la inclinación anatómica de la articulación (Kikuchi, et al, 2008).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Mediante sistemas comerciales de reconstrucción 3D basada en imagen médica se crea un modelo genérico en un formato neutro de intercambio de ficheros (Fig. 3).



Fig. 3: Reconstrucción 3D en formato stl

La reconstrucción de la anatomía mediante esta técnica implica un alto coste en recursos y tiempo, requiriendo diversos y complejos procesos en los que el factor humano participa activamente en la interpretación de datos

Para la generación del modelo paramétrico se importa la estructura a la aplicación de diseño mecánico 3D Solidworks®, este proceso se realiza mediante la creación de curvas a partir del modelo en formato neutro (Fig. 4).

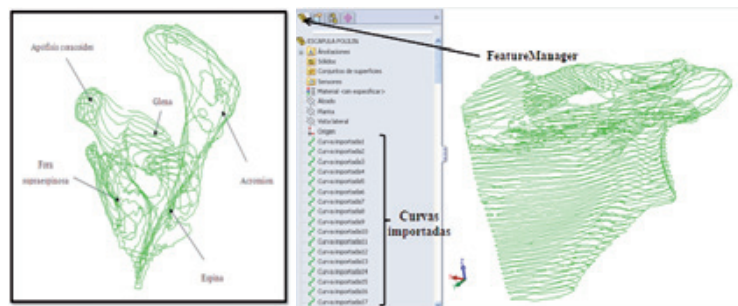


Fig. 4: Curvas obtenidas a partir del modelo stl

Las referidas curvas son tratadas y utilizadas como perfiles de superficies para el modelo 3D que permitirá la generación del modelo paramétrico (Fig. 5).

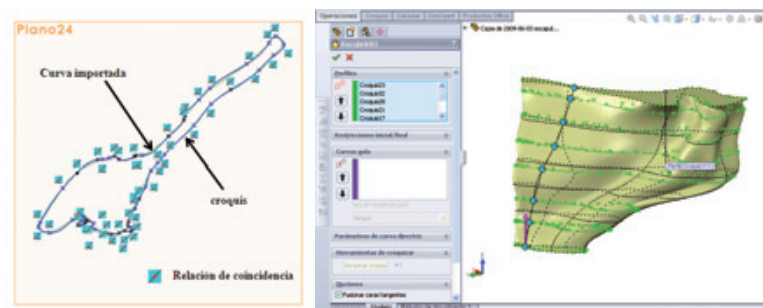


Fig. 5: Conversión de curvas a croquis

De esta manera se obtiene un modelo 3D de la articulación no paramétrico pero generado a partir de operaciones (recubrimiento, extrusión, etc.) de uso habitual en software de diseño mecánico (Fig. 6).



Fig. 6: Modelo stl (izda.) y modelo de operaciones (dcha.)

Obtenido el modelo en la aplicación *Solidworks®* se procede a implementar en el modelo aquellos parámetros que se considera que definen la articulación, como los ángulos de inclinación, torsión y retroversión de la glena (Fig. 7).

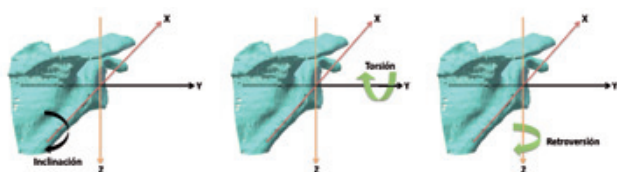


Fig. 7: Ángulos de inclinación, torsión y retroversión

Por su similitud con una forma elipsoidal, la glena se parametriza mediante sus diámetros mayor (D_g) y menor (d_g) como se aprecia en la Fig. 8.

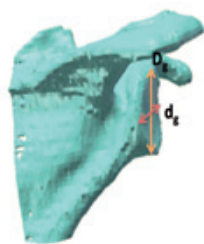


Fig. 8: Diámetros de la glena

La cabeza del húmero se parametriza mediante el diámetro de una esfera con la misma medida que la del paciente, mientras que el posicionamiento del húmero respecto a la glena se parametriza con las distancia entre los centros de

rotación y la distancia libre entre la cabeza humeral y el acromion.

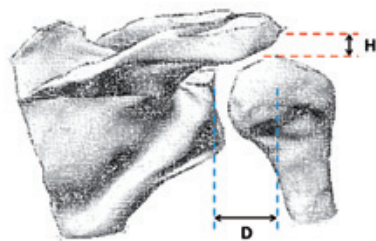


Fig. 9: Distancia entre centros de rotación y libre al acromion

Con los parámetros definidos se procede a crear los ejes y planos que gobiernan el modelo paramétrico (Fig. 10) y permiten su posicionamiento respecto a un sistema de coordenadas fijo en el paciente (Fig. 11).

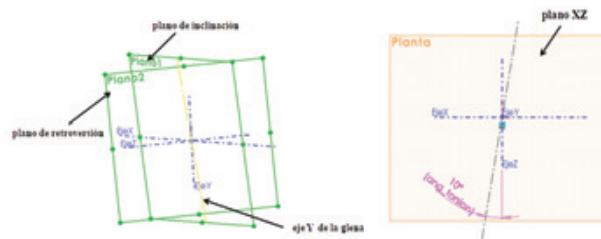


Fig. 10: Planos (izda.) y parametrización de ángulo de torsión (dcha.)

Para que el sistema de referencia creado en la glena sea orientable, han de introducirse una serie de parámetros en una tabla de diseño. En concreto, han de introducirse aquellos a partir de los cuales se fueron obteniendo los distintos planos y ejes que definen la orientación de la glena.

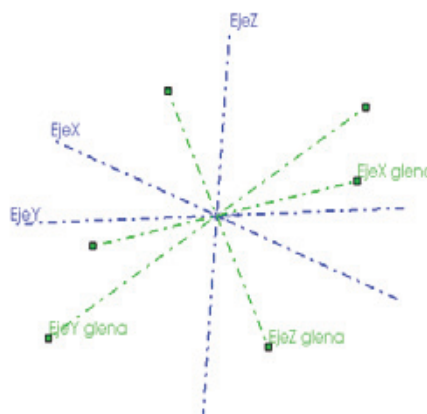


Fig. 11: Sistema de referencia del paciente (azul) y de posicionamiento de la glena (verde)

De una manera análoga se parametriza la glena mediante los dos diámetros que la definen (Fig. 12).



Fig. 12: Parametrización de los diámetros de la glena

Según se van generando los parámetros de control, se van incluyendo en una tabla de diseño, cuya modificación se transmite instantáneamente al modelo 3D paramétrico de la articulación. La tabla de diseño se realiza sobre Excel® (Fig. 13) siendo su manejo sencillo y facilitando de esta manera su uso por personal de diversos perfiles. La implementación del control paramétrico de la aplicación de diseño mecánico 3D

1	Tabla de diseño para: triendo_erp2										
2											
3	Predeterminado	12	32	10							
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											

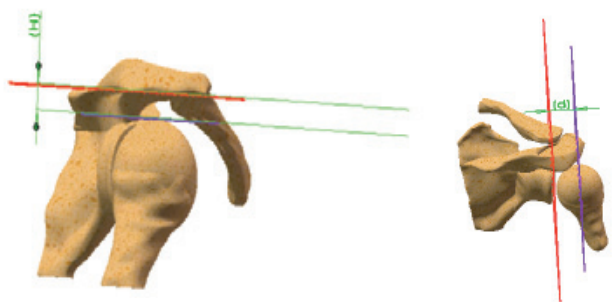
ing_indicador@Crosapi3
ing_entree@Crosapi4
ing_Torison@Crosapi5
diam_away@Crosapi14
diam_menor@Crosapi14

nuevos parámetros

Con las operaciones ya definidas mediante un número limitado de valores, se procede a transformar el modelo no paramétrico importado a *Solidworks*® en un modelo parametrizado (Fig. 14).

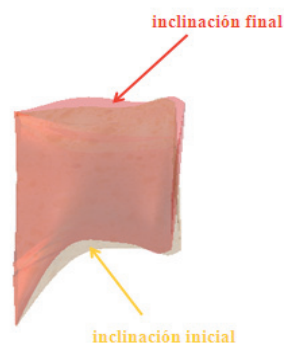


Con la inserción parametrizada del húmero en el modelo, se finaliza la fase de reconstrucción de la articulación.



4. RESULTADOS

Se obtiene un modelo paramétrico que responde a diferentes ángulos en los 3 ejes de la glena gobernado por una hoja Excel®, pudiendo modificarse la inclinación (Fig. 16), la retroversión (Fig. 17) y la torsión (Fig. 18).



retroversión final

retroversión inicial

En ese caso se encuentra por debajo de la retroversión final

Diagrama de torsión de un eje. Se muestra un eje con una sección transversal circular. Una flecha roja indica la 'torsión final' y una flecha amarilla indica la 'torsión inicial'.

El modelo paramétrico de la articulación también responde correctamente a las variaciones en el tamaño de la glena (Fig. 19).

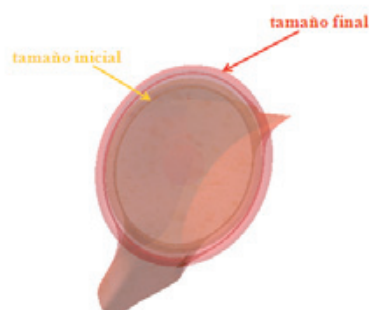


Fig. 19: Modificación del tamaño de la glena

El tamaño de la cabeza del húmero también está controlado correctamente por la hoja de Excel® (Fig. 20).



Fig. 20: Modificación del tamaño de la cabeza humeral

Se realiza la validación en el conjunto comprobando la variación dimensional del modelo en función de los valores asociados a cada parámetro en la hoja de Excel® (Fig. 21).

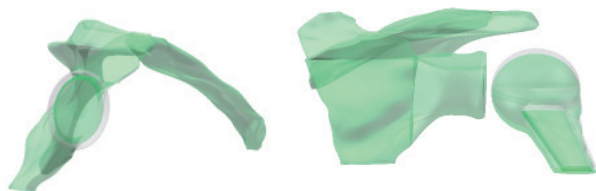


Fig. 21: Validación del conjunto

5. CONCLUSIONES

Mediante ocho parámetros (tres ángulos, dos diámetros de la glena, dos distancias y un diámetro) se caracteriza la articulación gleno-humeral de una manera satisfactoria para estudios diagnósticos, pre y post-quirúrgicos.

Variando los valores de los parámetros en una hoja de Excel® se reconstruye automáticamente la anatomía en una aplicación de diseño mecánico 3D (*Solidworks®*) en escasos instantes.

Sin los requerimientos de tiempo y recursos de las reconstrucciones 3D habituales se obtienen resultados significativamente satisfactorios. La técnica habitual de reconstrucción a partir de imagen médica consiste en la segmentación de las estructuras y su interpretación por personal técnico, realizando las modificaciones y ajustes que éste estime oportunas, para su posterior generación de un modelo 3D de superficies no paramétricas, resultando todo ello en una metodología lenta y consumidora de recursos, mientras que un método paramétrico reduce la reconstrucción a la obtención de las medidas establecidas en un protocolo. Dichas medidas se pueden obtener en tiempo de exploración diagnóstica y exportar a la aplicación que genera la reconstrucción 3D en segundos. El tiempo del proceso se ve de esta manera reducido de horas a minutos.

Es posible el estudio de la idoneidad de un implante u otro en función de los resultados de la reconstrucción, siempre

con menores costes. La capacidad de exportar la anatomía a una aplicación de diseño mecánico facilita la inclusión en el modelo de implantes en 3D, estudiando interferencias, colisiones, tamaños, y todas aquellas variables que se puedan considerar de interés.

El modelo paramétrico presentado responde correctamente a la variación en los valores de sus parámetros de gobierno.

6. DISCUSIÓN

El modelo propuesto mejora los tiempos de reconstrucción 3D de la anatomía, si bien, por su propia definición conceptual, representa detalles no relevantes para la anatomía global de la articulación, pero que pueden ser de interés en casos quirúrgicos. Es por ello una aplicación que debe emplearse con cautela en aquellos casos catastróficos o bien ser empleado como una orientación para la reconstrucción articular basada en la anatomía contralateral.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la amable colaboración y el interés de los Doctores en Medicina D. José Javier Martínez García y D. Celestino Guerra García, del Hospital de Cabueñes, Gijón. Así como del gerente de *Surg&Medic* D. Jesús de Pedro Suárez que amablemente facilitó el desarrollo de este proyecto.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ali A, Shahane S, Stanley D. "Total elbow arthroplasty for distal humeral fractures: Indications, surgical approach, technical tips, and outcome". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2010. Vol.19-2 p.53-58
- Churchill RC, Brems JJ, Kotschi H. "Glenoid size, inclination and version: An anatomic study". *Journal of shoulder and Elbow Surgery*. 2001. Vol.10-4 p.327-332.
- De Leest O, Rozing PM, Rozendal LA, Van der Helm FCT. "Influence of glenohumeral prosthesis geometry and placement on shoulder muscle forces". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 1995. Vol.4-1 p.S27.
- Flieg NG, Gatti CJ, Doro LC, Langenderfer JE, Carpenter JE, Hughes RE. "A stochastic analysis of glenoid inclination angle and superior migration of the humeral head". *Clinical Biomechanics*. 2008. Vol.23-5 p.554-561.
- Friedman RJ, Hawthorne K B, Genev B M. "The use of tomography in the measurement of glenoid version". *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1992. Vol. A74-7 p.1032-1037.
- Hattrup S. "Revision total shoulder arthroplasty for painful humeral head replacement with glenoid arthrosis". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2009. Vol.18-2 p.220-224
- Kapandji AI. *The Physiology of the Joints, Volume 1: Upper Limb*. 6ª edición. Churchill Livingstone, 2007. 372p. ISBN: 978-04-431-0350-6
- Kikuchi K, Itoi E, Yamamoto N, Seki N, Abe H, Minagawa H, Shimada Y. "Scapular inclination and glenohumeral joint stability: A cadaveric study". *Journal of Orthopaedic Science*. 2008. Vol.13-1 p.72-77.
- Liverneaux P, Nectoux E, Taleb C. "The future of robotics in hand surgery". *Chirurgie de la Main*. 2009. Vol.28-5 p.278-285