



# RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL MUÑÓN DE UN AMPUTADO TRANSFEMORAL A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE ESCÁNER 3D

JÉSICA ISAZA, ANA SERNA, DIEGO RESTREPO, FAVIANA GUTIÉRREZ, JUAN RAMÍREZ, ALEXANDER CORREA

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas  
Carrera 80 No. 65 – 223 Medellín – Colombia

(Recibido 7 de febrero de 2011, para publicación 28 de marzo de 2011)

**Resumen** – En este artículo se presenta el procesamiento de imágenes 3D obtenidas al escanear los positivos de muñones de amputados transfemorales usando como herramienta básica el diseño de experimentos, permitiendo obtener sólidos digitales sobre los que se realizan análisis mediante el método de los elementos finitos. El tratamiento consiste en el procesamiento de la nube de puntos obtenida del escáner, triangulación, generación de superficie y finalmente obtención de un sólido CAD a partir de un software de reconstrucción digital, para lo cual se pretende identificar las variables que más afectan el sólido obtenido. El procesamiento de datos se inicia con el reconocimiento y exploración de las principales herramientas del software, se analizan y depuran las variables básicas del proceso de reconstrucción digital mediante la comparación de 30 muñones reconstruidos inicialmente y que determinan los criterios suficientes para el diseño del experimento. El diseño experimental permite reducir la cantidad de parámetros a modificar en el proceso de reconstrucción, lo que sugiere que se emplea solo una fracción de las múltiples variables posibles, esto representa un ahorro significativo en tiempo y procesamiento de la información. Al realizar el análisis estadístico de 192 reconstrucciones dentro de las condiciones del diseño se establecen los niveles y factores que optimizan el proceso. Se logra obtener un sólido del muñón estéticamente adecuado con la menor desviación posible entre la malla original del escaneo y la obtenida en el proceso de reconstrucción, una geometría adecuada y una superficie regular que permiten un su posterior uso en modelos de análisis de esfuerzos mediante el método de los elementos finitos.

**Palabras clave** – Reconstrucción digital, amputado transfemoral, escáner 3D, diseño de experimentos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El nivel de confort que un individuo experimenta con una prótesis, debido a una amputación, es un factor primordial para el normal desarrollo de su vida. En muchas ocasiones la persona no se siente a gusto con la prótesis, por lo que es objeto de estudio desarrollar prótesis que mejoren la calidad de vida de las personas con esta discapacidad.

Los estudios para estas prótesis reportados en la literatura, usualmente inician simulando el contacto entre la extremidad y la prótesis. Estos análisis toman en cuenta la acción de la fricción y el deslizamiento en la interfaz muñón – *socket* [1]. Sin embargo, estos estudios se ven afectados por las propiedades y materiales del *socket* y el muñón, la forma y geometría del muñón y las propiedades mecánicas [2].

Las reconstrucciones digitales para simular la interfaz *socket* – muñón son comúnmente empleadas, se realizan por métodos como tomografías axiales computarizadas sobre el miembro [3] y por medio de imágenes obtenidas de resonancias magnéticas del paciente [4]. Estos métodos además de que reconstruyen el tejido muscular, adiposo y óseo del muñón, captan las deformaciones del miembro sobre la mesa del tomógrafo, obligando al amputado a someterse a una mayor radiación innecesaria.

Este tipo de reconstrucción puede verse limitada por inserciones o implantes que dificultan la reproducción y distorsionan la adquisición de datos. En su lugar se puede realizar reconstrucciones a partir de escaneos digitales sobre un molde tomado del muñón, adquiriendo sólo los datos necesarios de la superficie, sin tener que someter al paciente a radiación.

Adicionalmente, la diferencia entre los métodos radica en que los estudios que involucran radiación sobre el paciente, se centran en obtener distribuciones de presiones y no en reconstrucciones, por lo que se emplean métodos ya utilizados en otros estudios [5, 6].

En esta investigación se desarrolla un protocolo de reconstrucción digital en 3D del muñón de un amputado transfemoral, antes de entrar en el socket y sin predeformación, por medio de escaneos a un modelo real del muñón y utilizando el diseño de experimentos.

El procesamiento de datos se inicia con el reconocimiento y exploración de las principales herramientas del software, se analizan y depuran las variables básicas del proceso de reconstrucción digital. Mediante el diseño experimental, se identifican las variables significativas a modificar en el proceso de reconstrucción para optimizar el proceso, lo cual representa un ahorro considerable en tiempo de reconstrucción y procesamiento de la información.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada consiste en la construcción de moldes de yeso del miembro amputado, escaneo de estos moldes de yeso y reconstrucción digital en 3D utilizando diseño de experimentos. El resultado esperado es un sólido del muñón aceptable estéticamente con la menor desviación posible entre la malla original del escaneo y la obtenida en el proceso de reconstrucción, una geometría adecuada y una superficie regular que permitan un posterior uso en modelos de elementos finitos. Además se requiere llegar a este resultado manipulando solo una fracción de las múltiples variables posibles. A continuación se detallan estas etapas.

### 2.1. Toma y escaneado de los moldes

La muestra se toma sobre el miembro amputado de la persona en su posición regular, de pie, pretendiendo minimizar los errores de forma, que se presentan al trabajar con muñones deformados. Se colocan vendas de yeso alrededor del muñón, ajustándolas con la presión necesaria para no deformarlo, obteniéndose así el molde del muñón. Este molde se llena con yeso para reproducirlo en forma y tamaño real y luego se lo escanea en 3D.

### 2.2. Reconstrucción digital

Los datos entregados del escáner 3D son mallas, el software permite abrir el archivo como malla o como nube de puntos. Se optó por la segunda opción debido a que el tratamiento de datos es mucho más simple y aproximado al real.

El software consta de nueve módulos: Exploración, Polígono, Color, Curva, Superficie, Reconocimiento, Caracterización, Intercambio e Imagen 3D. Cada uno de éstos consta de varias herramientas que permiten el tratamiento de datos para mejorar la información del escaneado. A continuación se describen las herramientas utilizadas en la reconstrucción digital del muñón. Inicialmente se describe el módulo en el que se encuentra la herramienta, luego se describe cada herramienta y por último se muestran cada una de las opciones.

#### 2.2.1 Módulo de exploración

Permite filtrar el ruido y mediante rutinas inteligentes reducir la cantidad de puntos existentes en la nube. Además se pueden eliminar datos innecesarios y erróneos capturados durante el proceso de escaneado. El conjunto de puntos mejorados y reducidos se poligonizarán más rápidamente y resultará una superficie de mejor calidad. En la Tabla 1 se presentan las herramientas y opciones más importantes de este módulo.

#### 2.2.2 Módulo polígono

Este módulo ofrece un amplio conjunto de funciones para manipular y preparar los modelos de la malla poligonal para una serie de aplicaciones. En la Tabla 2 y Tabla 3 se presentan las herramientas y opciones más importantes de este módulo.

Tabla 1. Herramientas y opciones del módulo exploración.

Menú	Herramienta	Opciones
Construir: Permite perfeccionar la nube de puntos y construir una malla poligonal	Filtrar ruido: Permite eliminar los puntos en regiones no deseables debido a errores de medición o errores en el proceso de escaneado, son datos que no pertenecen al modelo real. El comando se puede utilizar repetidamente	Mínima distancia grupo a grupo: automática o manual
		Máximo tamaño de grupo: número de puntos
	Filtrar redundancias: Permite reducir el número de puntos demasiado cerca o solapados entre sí, existentes en un conjunto de puntos	
	Suavizar puntos: Suaviza las nubes de puntos para reducir la rugosidad, elimina el ruido de datos escaneados sin reducir la cantidad de puntos	Peso de suavizado
		Número de iteración
	Triangulación: Convierte una nube de puntos en un modelo poligonal consistente en una malla de triángulos que encierran un volumen	Superficie – 3D: automático ó manual. Condiciones opcionales: distancia entre puntos y ángulo admisible entre caras

Tabla 2. Herramientas y opciones del módulo polígono.

Menú	Herramienta	Opciones
Limpieza: Elimina o corrige las caras anormales	Hallar caras anormales: Comprueba si en el modelo hay caras que presentan defectos	
	Limpiar caras no <i>mainfold</i> : Cuando una cara comparte eje con dos o más caras, se presenta un error topológico que puede generar algunos errores en los cálculos o posteriores aplicaciones del modelo. Esta herramienta elimina estas caras defectuosas	
	Limpiar caras cruzadas: Cuando los ejes que comparten un vértice interceptan con otro, son geoméricamente incorrectos. Esta herramienta elimina estas caras defectuosas	
	Fijar caras normales: Esta herramienta busca y corrige todas las caras cuyo vector normal resulta invertido durante la triangulación 3D	Conservar topología o rugosidad
		Conservar geometría
		Fijar topología trenzada

Tabla 3. Herramientas y opciones del módulo polígono.

Menú	Herramienta	Opciones
Herramientas: Contiene las herramientas para manipular y perfeccionar la malla	Llenar huecos: Esta operación tapa los agujeros del modelo que se pudieran generar durante el proceso de escaneado. Construye una estructura poligonal para tapar el agujero de modo que el agujero y la región con lo rodea son remalladas para que la capa de polígonos sea organizada y continua	Superficie: Método (plana, suave o curva) y Opciones (suavizar el contorno del agujero antes del llenado)
	Decimación: Permite reducir la cantidad de polígonos de la malla para reducir la cantidad de detalles de la superficie capturados, reduce el número de triángulos mientras se conserva la forma de la superficie original	Alta calidad: número de caras o tasa de reducción y máximo error de desviación entre el modelo original y el simplificado
		Balance de curvatura: Mantener la posición de los vértices resultantes, asegurar que los ejes de la frontera no se muevan al aplicar la operación, conservar la calidad de malla y mantener los eje/vértices
	Suavizar: Reduce la rugosidad de la superficie, consecuencia de un proceso de escaneado muy detallado o por diferentes interferencias	Datos de gran tamaño
		Pelar: método (laplaciano, bucle, curvo, número de iteraciones, peso, con tolerancia, sin tolerancia mover frontera de vértices, suavizado restringido, mantener bordes afilados, mantener volumen), pintar
	Remallar: Esta opción aumenta la calidad de las caras retriangulándolas, de modo que quede lo más cercano a triángulos equiláteros	Local
Global (mantener bordes afilados y mantener los eje/vértices)		

Tabla 4. Herramientas y opciones del módulo superficie.

Menú	Herramienta	Opciones
Superficie	Crear	Superficie automática, número de parches, grado de detalle
		Ajuste de polígono: por curvas, por bucles

Tabla 5. Herramientas y opciones del módulo de caracterización.

Menú	Herramienta	Opciones
Sólido	Crear	Desde la superficie establecida: combinar, recortar y fusionar, fusión de la tolerancia, interactivo
		Desde la superficie sólida establecida: combinar, recortar y fusionar, interactivo

### 2.2.3 Módulo superficie

En este módulo se pueden generar superficies herméticas y suavizadas a partir de la malla. En la Tabla 4 se presentan las herramientas y opciones más importantes de este módulo.

### 2.2.4 Módulo de caracterización

En la Tabla 5 se presentan las herramientas y opciones más importantes de este módulo.

## 2.3. Análisis estadístico utilizando diseño de experimentos

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar y cuántas réplicas de cada uno se requieren, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible [7]. En las siguientes secciones se muestran los factores y niveles identificados, el diseño experimental seleccionado y el protocolo de experimentación.

### 2.3.1 Definición de niveles y factores

A través de varias reconstrucciones digitales se exploraron las variables y se identificaron sus posibles valores, concluyéndose que las variables o factores de interés a ser analizados y sus niveles son los siguientes: filtrar redundancia 2 veces ó 3 veces, decimar la malla con un radio de reducción de 40 ó de 60, suavizar la malla con un peso de 0.2, 0.4, 0.6 ó 0.8 y utilizar el método de comparación muñón–patrón ó patrón–muñón. Adicionalmente se quiso conocer si el Ingeniero que realiza la reconstrucción influye en el proceso.

Considerando que se tienen cinco factores y cada uno con distintos niveles, el diseño experimental más apropiado es el diseño factorial general, requiriéndose al menos dos réplicas para realizar el ANOVA [8], siendo entonces necesario realizar 192 corridas experimentales.

### 2.3.2 Protocolo de experimentación

El protocolo de reconstrucción a utilizar en cada corrida experimental es el siguiente: Importar los datos obtenidos del escáner en formato de nube de puntos en el software al módulo de exploración (Fig. 1). Filtrar el ruido, filtrar la redundancia (Fig. 2), suavizar los puntos y construir la malla (Fig. 3).

Ingresar al módulo polígono, limpiar la malla de caras defectuosas, limpiar la malla de caras anormales, llenar el agujero. Luego decimar la malla con reducción de radio, suavizar la malla y hacer un remallado global, para obtener una malla más uniforme (Fig. 4). Finalmente realizar la comparación entre el muñón original y el tratado digitalmente (Fig. 5).

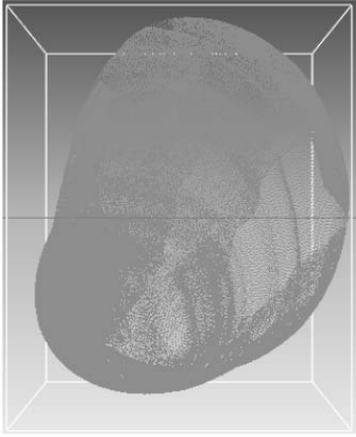


Fig. 1. Nube de puntos original.

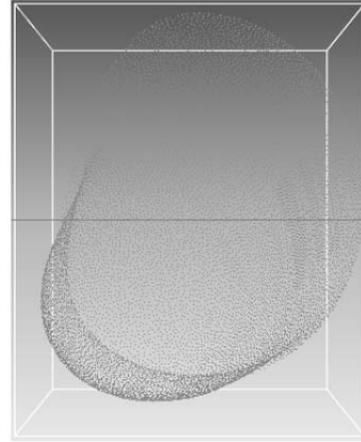


Fig. 2. Nube de puntos con un filtrado de redundancia de tres veces.

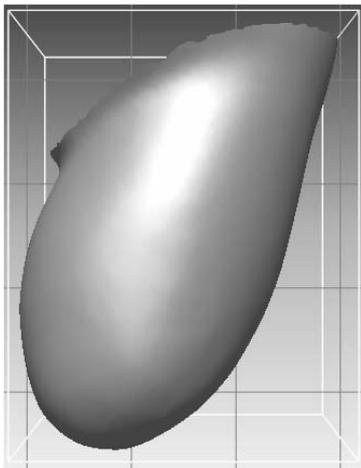


Fig. 3. Nube de puntos original.

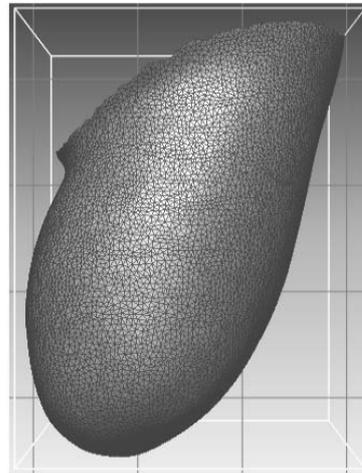


Fig. 4. Muñón con remallado.

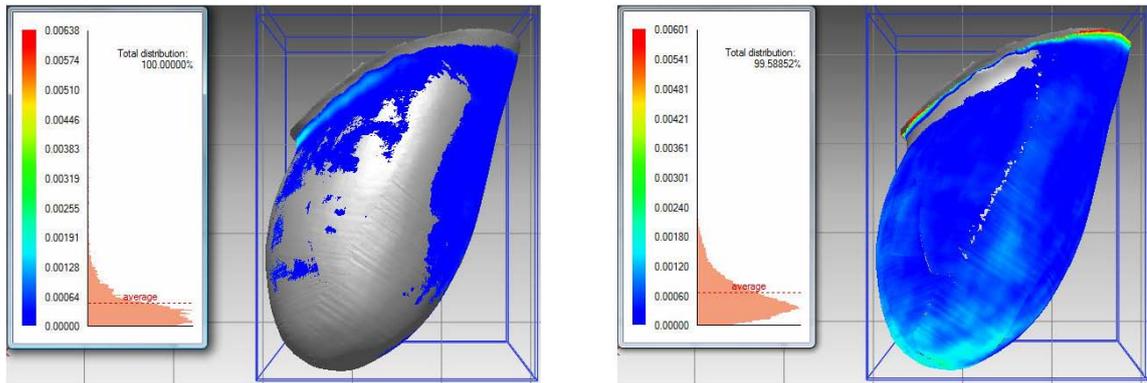


Fig. 5. Comparación entre muñones.

**Modelo lineal general**

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Filter redundancy	fijo	2	2; 3
Reduction Ratio	fijo	2	40; 60
Weigth	fijo	4	0,2; 0,4; 0,6; 0,8
Engineer	fijo	3	Ana; Diego; J�sica
Method	fijo	2	MUÓN - PATRÓN; PATRÓN - MUÓN

Análisis de varianza para Y, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Filter redundancy	1	0,217507	0,217507	0,217507	638,71	0,000
Reduction Ratio	1	0,020928	0,020928	0,020928	61,46	0,000
Weigth	3	0,048147	0,048147	0,016049	47,13	0,000
Engineer	2	0,001363	0,001363	0,000681	2,00	0,141
Method	1	4,486239	4,486239	4,486239	13173,83	0,000
Filter redundancy*Reduction Ratio	1	0,031097	0,031097	0,031097	91,32	0,000
Filter redundancy*Weigth	3	0,094554	0,094554	0,031518	92,55	0,000
Filter redundancy*Engineer	2	0,000816	0,000816	0,000408	1,20	0,306
Filter redundancy*Method	1	0,052349	0,052349	0,052349	153,72	0,000
Reduction Ratio*Weigth	3	0,063305	0,063305	0,021102	61,96	0,000
Reduction Ratio*Engineer	2	0,000504	0,000504	0,000252	0,74	0,480
Reduction Ratio*Method	1	0,025369	0,025369	0,025369	74,50	0,000
Weigth*Engineer	6	0,001156	0,001156	0,000193	0,57	0,757
Weigth*Method	3	0,064014	0,064014	0,021338	62,66	0,000
Engineer*Method	2	0,000045	0,000045	0,000022	0,07	0,937

S = 0,0184538 R-cuad. = 99,42% R-cuad. (ajustado) = 98,84%

Fig. 6. ANOVA realizado utilizando Minitab  versión 15.

### 3. RESULTADOS

Del ANOVA mostrado en la Fig. 6, realizado con Minitab versi n 15, se puede observar que los siguientes factores principales son significativos: Filtrar redundancia, Radio de reducción, Peso de 0.6 y Método, ya que el *p*-value es menor que 0.05 al igual que sus respectivas interacciones dobles.

A partir de la representación de los efectos principales (Fig. 7) y de las interacciones (Fig. 8), se recomienda fijar factores en los siguientes niveles: Filtrar la redundancia 3 veces, decimar la malla con una reducción de radio de 40, suavizar la malla con un peso de 0.6 y en la comparación seleccionar primero el muón y luego el patrón.

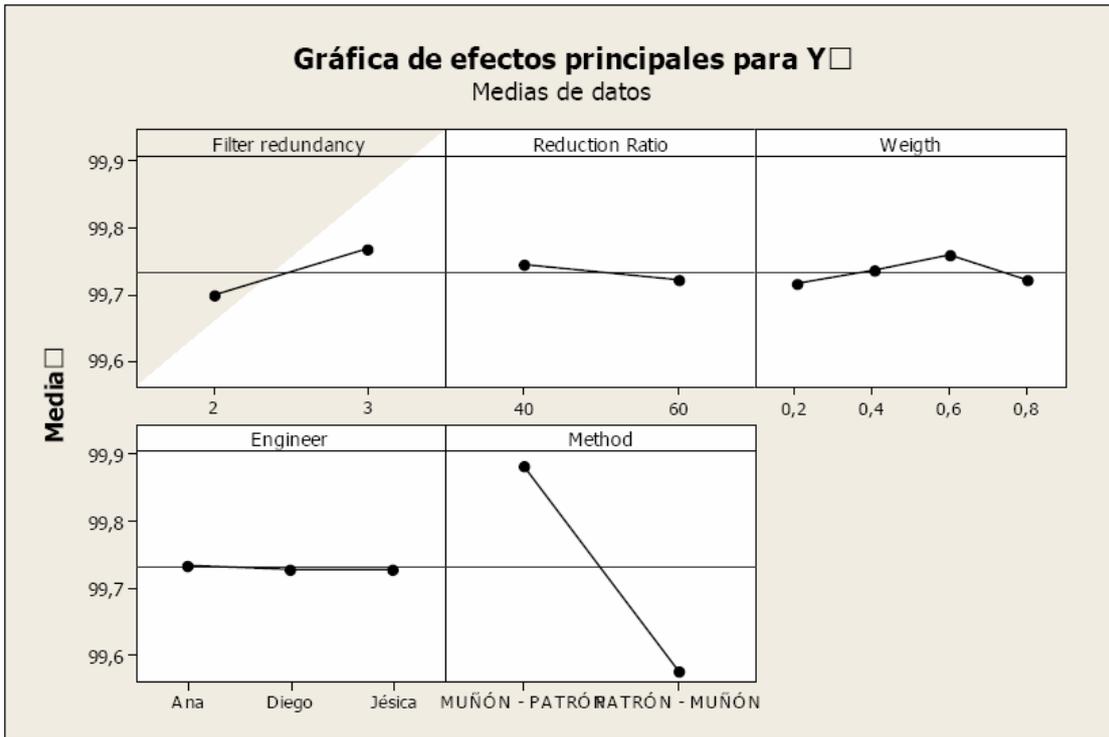


Fig. 7. Gráfica de efectos principales para la variable respuesta, utilizando Minitab® versión 15.

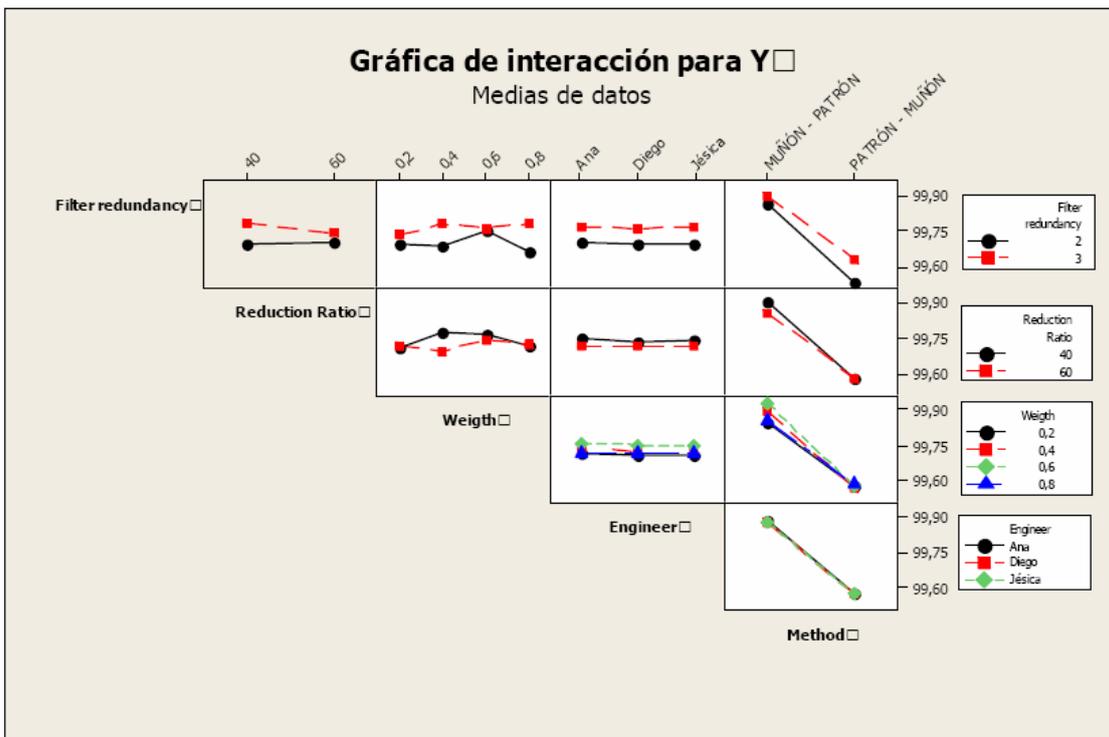


Fig. 8. Gráfica de interacción para la variable respuesta, utilizando Minitab® versión 15.

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el diseño experimental realizado, se definió un protocolo de reconstrucción, el cual sugiere filtrar la redundancia 3 veces, decimar la malla con una reducción de radio de 40, suavizar la malla con un peso de 0.6 y en la comparación seleccionar primero el muñón y luego el patrón. Es importante destacar que este proceso es independiente del ingeniero que realiza la reconstrucción. El modelo permite explicar un 98.84% de la variabilidad.

La aplicación correcta del protocolo de reconstrucción permite reducir la cantidad de puntos posibles, asegurando a la vez la máxima calidad de la reconstrucción digital y la estandarización del proceso, evitándose errores por desconocimiento del software.

Al emplear una menor cantidad de puntos se disminuye el peso digital de la nube de puntos, se homogeniza la superficie eliminando datos redundantes de acuerdo a un radio de separación, lo cual evita la creación de caras anormales al triangular, obteniendo al final una superficie más ligera de calcular para el software.

Al tener la nube los puntos equidistantes se facilita la creación de mallas más uniformes, esta misma uniformidad permite generar menos superficies y de características más regulares que permiten obtener un producto final de fácil manejo en usos posteriores como el análisis por el método de elementos finitos.

El suavizado por curvatura garantiza la continuidad de superficies curvas, evitando irregularidades o cambios bruscos en las caras del sólido reconstruido.

El valor de la tasa de reducción para la decimación de alta calidad resultante del análisis, es muy coherente con el proceso realizado, dado que en la etapa del filtrado de redundancia se realiza el cribado de los puntos redundantes, lo que permite reducir el número de triángulos innecesarios para conservar la geometría deseada.

#### REFERENCIAS

- [1] Mak, A.F.T., Zhang, M., Boone, D.A., “State of the art research in lower limb prosthetic biomechanics–socket interface”, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **38**, 161–74 (2001)
- [2] Silver-Thorn, M.B., Childress, D.S., “Parametric analysis using the finite element method to investigate prosthetic interface stresses for persons with transtibial amputation”, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **33**, 227–38 (1996)
- [3] Amali, R., Noroozi, S., Vinney, J., Sewell, P., Andrews, S., “Predicting Interfacial Loads between the Prosthetic Socket and the Residual Limb for Below-Knee Amputees – A Case Study”, Blackwell Publishing Ltd, *Journal of Strain*, **42**, 3–10 (2006)
- [4] Lee, W.C.C., Zhang, M., “Using computational simulation to aid in the prediction of socket fit: A preliminary study”, *Medical Engineering & Physics*, **29**, 923–929 (2007)
- [5] Lee, W.C.C., Zhang, M., Jia, X.H., Cheung, J.T.M., “Finite element modeling of the contact interface between transtibial residual limb and prosthetic socket”, *Medical Engineering and Physics*, **26**, 655–62 (2004)
- [6] Lee, W.C.C., Zhang, M., Boone, D.A., Contoyannis, B., “Finite element analysis to determine the effect of monolimb flexibility on structural strength and interaction between residual limb and prosthetic socket”, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **41**(6A), 775–86 (2004)
- [7] Gutiérrez, H., de la Vara, R., *Análisis y diseño de experimentos*, McGraw-Hill, México (2008)
- [8] Montgomery, D., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, United States of America, fifth edition (2001)

#### DIGITAL RECONSTRUCTION OF TRANSFEMORAL AMPUTEE STUMP FROM 3D SCANNER DATA

**Abstract** – This article presents the 3D image processing obtained by scanning the positive solids from transfemoral amputees stumps, using as a basic tool the design of experiments, allowing getting digital Solids to be

analyzed by finite element methods. The method consists on the processing of the point cloud obtained from the Scanner, the triangulation, the generation of a surface and finally obtaining a solid CAD from a digital reconstruction software, for which is intended to identify the variables that most affects the solid obtained. Data processing begins with the recognition and exploration of the main tools of the software, analyzing and debugging the basic variables of the digital reconstruction process by the comparison of the 30 initially reconstructed stumps, which determine the enough criteria for the design of the experiment. The experimental design reduces the number of parameters to modify in the reconstruction process, suggesting employ only a fraction of the many possible variables; this represents a significant savings of time and information processing. When performing statistical analysis of 192 reconstructions within the design conditions, the levels and factors that optimize the process were established. It is possible to obtain a solid stump esthetically appropriate with the lowest possible deviation, from the original mesh of the scan and the obtained in the process of reconstruction, a proper geometry and a smooth surface, that allow further use in stress analysis models by finite element method.

**Keywords** – Digital reconstruction, Transfemoral amputee, 3D scan, Experiment design.