



**Universidad**  
Zaragoza

# **PROGRAMA OFICIAL DE POSGRADO: INGENIERÍA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN**

## **MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS MECÁNICOS**

### **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

DISEÑO, OPTIMIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE FÉRULAS PARA CIRUGÍA GUIADA  
EN IMPLANTOLOGÍA DENTAL MEDIANTE TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA



**Escuela de  
Igeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

**AUTOR:** ALBERTO FRISA RUBIO

**DIRECTORES:**

1. JORGE SANTOLARIA MAZO  
Área: Ingeniería de los procesos de fabricación  
Departamento: Ingeniería de diseño y fabricación
2. MARÍA NAVERAC AZNAR  
Área: Estomatología  
Departamento: Cirugía, Ginecología y Obstetricia

**CURSO ACADÉMICO:** 2010/2011

**CONVOCATORIA:** DICIEMBRE 2011

***Agradecimientos:***

El presente Trabajo Fin de Máster es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas colaborando, corrigiendo, dando ánimo y acompañando en los buenos momentos y en los que no lo fueron tanto.

Agradezco especialmente al Doctor Jorge Santolaria Mazo y a María Naverac Aznar por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

A David Samper Carnicer por su colaboración y ayuda en la creación del programa realizado mediante MATLAB.

Gracias también a mis compañeros y amigos del Máster, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante este año y medio, en especial Elisa y Jorge.

Por supuesto a mi familia y amigos, que de forma incondicional entendieron mis ausencias y mis malos momentos, y siempre estuvieron atentos para saber cómo iba mi proceso.

Gracias a todos.



# TRABAJO FIN DE MÁSTER.

---

## RESÚMEN.

El procedimiento actual para la elaboración de guías quirúrgicas para implantología dental, se basa en procedimientos que desarrollan centros especializados a partir de imágenes médicas como tomografías computarizadas o placas de rayos X, desde dónde se planifica la posición, tipo y características del implante dental y la férula a emplear como guía durante el trabajo quirúrgico.

El presente Trabajo Fin de Máster trata en primer lugar de mejorar la cirugía optimizando la posición del implante mediante algoritmos matemáticos a través de la herramienta MATLAB, lo que ayudaría a aumentar el éxito de la intervención o a plantear una situación inicial de planificación para los profesionales en base a un posicionamiento que maximiza el hueso alrededor del implante, como uno de los principales criterios para la implantación duradera y osteointegración futura. Por otro lado, salva la problemática existente sobre la posibilidad que el implante llegue a colisionar con el nervio maxilar inferior incluyéndolo en los cálculos del algoritmo de optimización.

De este modo, en este trabajo se abordará el procedimiento completo de diseño y fabricación de una guía quirúrgica dentosoportada para la colocación de implantes dentales, partiendo de la tomografía de una mandíbula inferior a intervenir. Una vez obtenido el CAD a partir de la tomografía, el procedimiento partirá de la planificación manual del dentista y planteará, mediante una técnica de optimización no lineal, varias alternativas de algoritmos de optimización de la posición de los implantes con el objetivo de maximizar el espesor de hueso entorno a cada uno de ellos. Como dato de entrada al algoritmo se partirá del archivo 3D .STL de la mandíbula, que se dividirá en capas para obtener nubes de puntos parciales a modo de secciones.

El algoritmo de optimización trabajará con nubes de puntos y efectuará dichas optimizaciones de acuerdo a:

- Diagrama de Voronoi: establecerá para cada capa de trabajo un nuevo punto del eje del implante de manera que equidiste de los puntos restantes de las paredes de la mandíbula.
- Optimización del eje de implante: partiendo del eje del implante planificado inicialmente definido por un vector de 6 componentes que contiene las tres coordenadas x,y,z de su punto base y las tres coordenadas i,j,k que definen su vector dirección, se obtiene un nuevo vector del implante que ha definido una nueva dirección que minimiza la diferencia total por capa entre cada punto del eje y la distancia al punto más próximo de la pared de la mandíbula.

Con esta nueva planificación obtenida, se lleva a cabo el procedimiento de diseño de una férula de montaje dentosoportada para su uso en la cirugía mediante fabricación aditiva con



prototipado rápido, incluyendo las consideraciones de diámetro de los registros de guiado de fresado y colocación de implantes, profundidad máxima de fresado y zonas de irrigación.

Finalmente, la validación del presente trabajo se realiza mediante la fabricación de un biomodelo de la mandíbula del paciente para el que se ha elaborado la férula optimizada, mediante prototipado rápido a partir del CAD, sobre la que se evaluará el montaje de la férula obtenida también mediante técnicas de fabricación aditiva.



## ÍNDICE.

<b>TRABAJO FIN DE MÁSTER.</b>	<b>3</b>
<b>RESÚMEN.</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE.</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1. OBJETIVO.	7
<b>2. PROCESO ACTUAL. EJEMPLO DE GUÍA TÉCNICA.</b>	<b>9</b>
2.1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE CIRUGÍA GUIADA.	9
2.2. PREPARACIÓN DEL SITIO DEL IMPLANTE.	10
2.3. EXACTITUD DE LOS SISTEMAS DE CIRUGÍA GUIADA PARA IMPLANTOLOGÍA ORAL.	11
2.3.1. FUNDAMENTO.	11
2.3.2. MATERIAL Y MÉTODO.	12
2.3.3. RESULTADO.	12
2.3.4. CONCLUSIONES.	12
<b>3. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN AVANZADA PARA APLICACIONES MÉDICAS.</b>	<b>14</b>
3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO PARA APLICACIONES MÉDICAS.	14
3.1.1. ANTECEDENTES DE PROTOTIPADO RÁPIDO.	14
3.1.2. PREPARACIÓN DEL ARCHIVO.	15
3.1.3. RELACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS.	15
3.1.4. DESVENTAJAS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO PARA APLICACIONES MÉDICAS.	16
3.2. APLICACIONES QUIRÚRGICAS DE REALIDAD VIRTUAL.	16
3.2.1. BIOMODELADO CRANEO-MAXILOFACIAL.	16
3.2.1.1. INTEGRACIÓN DE BIOMODELOS CON MOLDES DENTALES.	17
3.2.1.2. USO DE BIOMODELOS PARA DAR FORMA A IMPLANTES MAXILOFACIALES	17
3.2.1.3. USO DE BIOMODELOS PARA PREFABRICAR PLANTILLAS Y FÉRULAS.	17
3.2.1.4. USO DE BIOMODELOS EN PRÓTESIS DE RECONSTRUCCIÓN.	18
3.3. SOFTWARE PARA LA TRANSFERENCIA DE DATOS MÉDICOS.	18
3.3.1. MIMICS.	18
3.3.2. SIMPLANT.	19
<b>4. FÉRULAS.</b>	<b>20</b>
4.1. TIPOS DE FÉRULAS GUÍADAS, ELECCIÓN DEL TRATAMIENTO.	20
4.1.1. FÉRULAS MUCOSOPORTADAS	20
4.1.2. FÉRULAS OSEOSOPORTADA.	20
4.1.3. FÉRULAS DENTOSOPORTADA.	21
4.2. TEMPERATURA DE FRESCO.	21
4.3. CONCLUSIONES CLÍNICAS.	21
<b>5. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN. INTERFAZ DE TRABAJO.</b>	<b>22</b>
5.1. DATOS DEL PROYECTO MÉDICO ESTUDIADO.	22
5.1.1. IMPLANTE 1.	23
5.1.2. IMPLANTE 2.	23
5.2. MANUAL DEL PROGRAMA.	23
5.2.1. OPTIMIZACIÓN SEGÚN DIAGRAMA DE VORONOI.	25
IMPLANTE 1.	26



IMPLANTE 2	32
5.2.2. OPTIMIZACIÓN DEL EJE DEL IMPLANTE.	39
IMPLANTE 1.	41
IMPLANTE 2.	44
<b>6. SECUENCIA DE TRABAJO.</b>	<b>47</b>
6.1. OBTENER ARCHIVOS .STL DE LA PLANIFICACIÓN DEL DENTISTA.	47
6.2. INSPECCIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO.	48
6.2.1. GEOMAGIC STUDIO.	48
6.3. OBTENER ARCHIVOS .SSL DE CAPAS DE NUBES DE PUNTOS EN MAGICS.	48
6.3.1. MAGICS.	49
6.4. LANZAR PROCEDIMIENTOS DE OPTIMIZACIÓN.	50
6.5. OBTENER LA FÉRULA EN GEOMAGIC QUALIFY A PARTIR DE LA OPTIMIZACIÓN.	51
6.5.1. GEOMAGIC QUALIFY.	57
6.6. FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE PROTOTIPADO RÁPIDO.	57
<b>7. LÍNEAS FUTURAS.</b>	<b>59</b>
<b>8. CONCLUSIONES.</b>	<b>60</b>
<b>ANEJOS A LA MEMORIA.</b>	<b>61</b>
I. COMPARATIVA DE OPTIMIZACIONES.	61
II. ALGORITMO DEL PROGRAMA.	64
II.a. CONFIGURACIÓN INICIAL DEL PROGRAMA. CARGAR FICHEROS.	64
II.b. INTERFAZ DE ACCESO A PROCEDIMIENTOS DE OPTIMIZACIÓN.	68
II.c. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.	75



# 1. INTRODUCCIÓN

---

Este documento recoge el proceso llevado a cabo durante el presente Trabajo Fin de Máster.

Se abordan aspectos generales como:

1. Sistemas de cirugía guiada para implantología dental. Férulas, fresas e implantes empleados.
2. Tecnologías de fabricación para aplicaciones médicas (prototipado rápido).

Por otro lado, se expone el trabajo desarrollado:

1. Procedimientos de optimización realizados mediante interfaz en MATLAB.
2. Secuencia de trabajo propuesta.
  - a. Obtener los modelos STL de la planificación del dentista mediante el software SimPlant o Mimics.
  - b. Obtener los archivos de capas mediante el software Magics.
  - c. Obtener posiciones optimizadas para los implantes.
  - d. Diseño de férula mediante el software Geomagic Qualify a partir de la mandíbula del modelo y considerando la posición de los implantes y la profundidad de fresado.
  - e. Fabricación de la férula mediante prototipado rápido.

## 1.1. OBJETIVO.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo prioritario la optimización de la posición de implantes dentales en procedimientos de cirugía guiada en implantología dental con la finalidad de maximizar el volumen de hueso entorno al implante. El hecho de maximizar el volumen de hueso puede no ser el criterio médico definitivo, aunque es de los más importantes, y en el presente Trabajo Fin de Máster es tomado como mejor criterio para mostrar los algoritmos desarrollados. También, la optimización bajo el criterio descrito podría ser considerada como posición óptima inicial a partir de la cual considerar otros criterios médicos.

Igualmente, otro de los objetivos centrales del presente trabajo es la programación de un software mediante MATLAB para realizar los cálculos según las optimizaciones desarrolladas. El algoritmo que ha sido programado efectúa dos optimizaciones diferentes según los siguientes criterios:

- Diagrama de Voronoi: establecerá para cada capa de trabajo un nuevo punto del eje del implante de manera que equidiste de los puntos restantes de las paredes de la mandíbula.
- Optimización del eje de implante: partiendo del eje del implante planificado inicialmente definido por un vector de 6 componentes que contiene las tres coordenadas x,y,z de su punto base y las tres coordenadas i,j,k que definen su vector dirección, se obtiene un



nuevo vector del implante que ha definido una nueva dirección que minimiza la diferencia total por capa entre cada punto del eje y la distancia al punto más próximo de la pared de la mandíbula.

Asimismo, dentro del planteamiento del proyecto, figura la fabricación aditiva mediante prototipado rápido de las férulas que contienen las guías de alojamiento para el fresado, de acuerdo a las posiciones optimizadas obtenidas.

Finalmente, la validación del presente trabajo se realiza mediante la fabricación de un biomodelo de la mandíbula del paciente para el que se ha elaborado la férula optimizada, mediante prototipado rápido a partir del CAD, sobre la que se evaluará el montaje de la férula fabricada.



## 2. PROCESO ACTUAL. EJEMPLO DE GUÍA TÉCNICA.

---

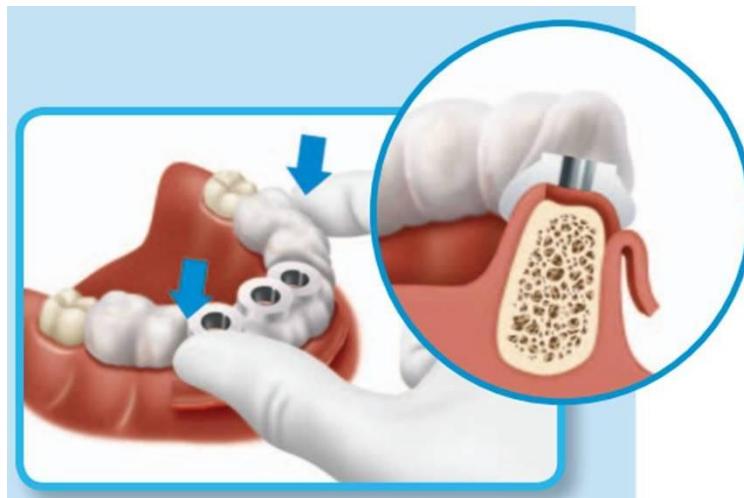
### 2.1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE CIRUGÍA GUIADA<sup>12</sup>.

1. El médico realiza un examen clínico y toma los registros y el diagnóstico del paciente. Posteriormente, se realiza el plan general del tratamiento restaurador desarrollándose en conjunto con un equipo de implantes. Tanto el diagnóstico y las solicitudes específicas del paciente influyen en el tipo de tratamiento a elegir.
2. Para obtener toda la información vital de la anatomía del paciente, se lleva a cabo una tomografía computarizada (TC) o una tomografía de haz de cono (CB Scan) de acuerdo a las instrucciones generales de análisis del proveedor de software (incluyendo la preparación del paciente, la colocación, la reconstrucción de imágenes y los parámetros de análisis). Sólo una tomografía es necesaria para capturar toda la información sobre la anatomía del paciente y la exploración de prótesis. Una tomografía computarizada o de haz de cono con los parámetros adecuados es fundamental para una buena planificación.
3. Los datos originales de la tomografía se envían a un centro de tratamiento para la conversión de los datos en un proyecto. Se crean las representaciones 3D de la anatomía del paciente. Los datos de la tomografía computarizada se convierte en un formato que permite que ser utilizada por el software de planificación seleccionado, o se importa directamente. Entonces, el caso se estudia mediante el software de planificación del tratamiento.
  - a. En la realización del presente trabajo, el software utilizado para tales fines es SimPlant, de Materialise NV.
4. La conversión de los datos, proporciona toda la información necesaria para planificar los implantes. Tras realizar la planificación, el personal médico puede discutir con los colegas, con el laboratorio dental, el paciente.
5. La planificación del tratamiento final se transforma en una guía de perforado o férula. Esta guía unirá la planificación con la cirugía real. El proveedor de software o en el laboratorio dental fabrica la guía quirúrgica compatible para el caso específico.
6. El fabricante ofrece una guía quirúrgica, junto con el protocolo quirúrgico para cada preparación de la posición del implante. El protocolo quirúrgico proporciona información detallada sobre la secuencia de perforación adecuada y la selección del tubo adaptador para la preparación quirúrgica de cada posición del implante.
7. La guía quirúrgica de diente, de mucosa o de hueso-soportado se fija en el sitio quirúrgico. Los pernos de fijación del fabricante de la guía pueden ser utilizado para una guía mucosa-soportada.

---

<sup>1</sup> Zimmer Guided Surgery Technique Guide.

<sup>2</sup> SimPlant SurgiGuide Cookbook; Materialise Medical.



## 2.2. PREPARACIÓN DEL SITIO DEL IMPLANTE<sup>3</sup>.

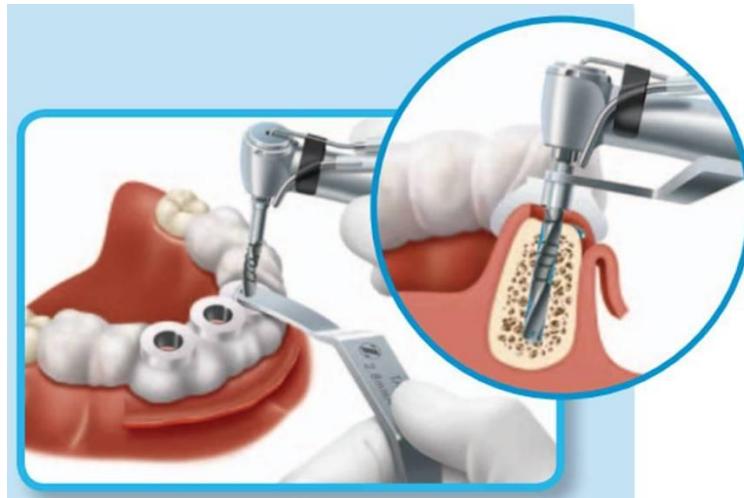
1. Se referencia siempre el protocolo quirúrgico para el caso específico con la guía quirúrgica, se sigue la secuencia de los adaptadores de tubo y fresas quirúrgicas para preparar la osteotomía del implante.

El adaptador de tubo se ajusta dentro de la inserción del tubo de titanio en la guía quirúrgica. Los adaptadores de tubo (usados en conjunción con las fresas y la longitud específica de las guías quirúrgicas) proporcionan la posición, angulación y control de la profundidad, y están marcados para su fácil identificación. Los adaptadores de tubo se pueden utilizar en el lado izquierdo o derecho del paciente cuando los agujeros en ambos lados tienen idéntico diámetro.

2. Siguiendo el protocolo de la guía quirúrgica, se selecciona el adaptador de tubo inicial (diámetro y tamaño). Se coloca el adaptador de tubo en el tubo guía en el lado más conveniente.
3. Se selecciona la fresa inicial del protocolo (diámetro y longitud). Se verifica la longitud de la fresa con el calibre de longitud de la fresa.
4. Se fresa para iniciar la osteotomía a través del adaptador del tubo hasta que la brida de perforación se detiene en la parte superior del adaptador de tubo. La profundidad de perforación predeterminada se logra mediante la combinación de la altura de guía personalizada y la selección apropiada de perforación, indicada en el protocolo del fabricante de la guía.

---

<sup>3</sup> Zimmer Guided Surgery Technique Guide.



5. Se retira el adaptador de tubo y se coloca el siguiente adaptador de tubo en la abertura del tubo guía. Se utiliza la siguiente fresa de la secuencia, para ampliar la osteotomía a través del adaptador del tubo hasta que la brida de perforación se detiene en la parte superior. Se comprueba la longitud de perforación con el calibre de longitud de la fresa.
6. Se repite la operación anterior para el resto de perforaciones de la planificación.
7. Se retira la guía quirúrgica y se sigue las indicaciones convencionales de la colocación del implante.

## 2.3. EXACTITUD DE LOS SISTEMAS DE CIRUGÍA GUIADA PARA IMPLANTOLOGÍA ORAL<sup>4</sup>.

### 2.3.1. FUNDAMENTO.

Los sistemas de cirugía guiada están siendo introducidos hoy en día en la práctica clínica habitual, aunque la información sobre su eficacia y precisión aún es limitada. El objetivo de la revisión es valorar la evidencia disponible en la literatura acerca de la exactitud de los sistemas de cirugía guiada para implantología oral, analizada mediante un meta-análisis.

La osteointegración de implantes dentales es, hoy en día, un procedimiento altamente predecible. Incluso en aquellos pacientes con limitaciones en la disponibilidad ósea, la utilización de técnicas de regeneración nos permite colocar los implantes de acuerdo con un criterio protésico ideal.

Tradicionalmente se realiza una planificación previa basada en el estudio de radiografías convencionales, donde se evalúa la disponibilidad ósea y la ubicación de las estructuras anatómicas más relevantes. Como complemento, se pueden realizar guías quirúrgicas basadas en un encerado diagnóstico que nos permiten transmitir la información obtenida durante la planificación al campo quirúrgico. Sin embargo, ni las radiografías ni las guías quirúrgicas convencionales permiten combinar la información de la anatomía del paciente y de la futura

<sup>4</sup> Exactitud de los sistemas de cirugía guiada para implantología oral. Revisión sistemática; Rodríguez Sánchez, J. Alberto; Cuesta Frechoso, Susana; Tobias, Aurelio; Sicilia Felechosa, Alberto.



restauración, por lo que incluso cuando hay una buena integración de los implantes la localización de los mismos puede no coincidir con los requerimientos protésicos.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado sistemas que proporcionan un posicionamiento tridimensional adecuado del implante con respecto a parámetros protésicos y anatómicos. La introducción de la tomografía computarizada (TC) en la planificación implantológica estimuló el desarrollo de programas informáticos que proporcionaron la posibilidad de realizar una planificación virtual previa a la cirugía. Mediante estos programas, podemos seleccionar tanto la localización de los implantes como la longitud y el diámetro de los mismos. El desarrollo de la TC de haz de cono permite salvar los inconvenientes de la tomografía convencional, pudiendo obtener imágenes de alta calidad en 3D con una dosis de radiación razonablemente baja.

Para poder transmitir la información de la planificación al campo quirúrgico se desarrollan dos sistemas. Los sistemas estáticos utilizan guías quirúrgicas fabricadas en laboratorio mediante máquinas de fresado o bien guías esterolitográficas realizadas gracias a la tecnológica CAD-CAM (computer aided design / computer assisted manufacturing). Los sistemas dinámicos son sistemas de navegación que permiten ver en “tiempo real” la posición de la pieza de mano con respecto a las estructuras anatómicas del paciente, dirigiendo el fresado de acuerdo con la trayectoria planificada previamente.

La cirugía guiada es una tecnología accesible hoy en día, con un amplio número de estudios recogidos en la literatura. Algunos de los sistemas estudiados están presentes ya en la práctica clínica y otros están en el camino de convertirse en una opción de tratamiento rutinaria. En dichos estudios los autores informan acerca de la exactitud de la posición de los implantes comparada con la planificación previa virtual.

### 2.3.2. MATERIAL Y MÉTODO.

Se realiza una búsqueda sistemática mediante el buscador PubMed de artículos en inglés publicados hasta Septiembre del 2009 que revelen información acerca de la exactitud de los sistemas de cirugía guiada. Se analiza mediante un modelo de efectos aleatorios la media de desviación medida en el punto de entrada de la fresa o del implante. Se realiza un análisis por subgrupos en función del sistema utilizado, tipo de localizaciones medidas o diseño del estudio.

### 2.3.3. RESULTADO.

En los 20 estudios seleccionados, la desviación media en el punto de entrada de la fresa fue de 0,73 mm (IC 95%: 0,59-0,86) con un máximo de 3,4 mm.

### 2.3.4. CONCLUSIONES.

La cirugía guiada, a menudo, se recomienda para realizar procedimientos de cirugía sin colgajo, para aquellos en los que la cantidad de hueso es limitada o la ubicación de los implantes es cercana a estructuras anatómicas. Por ello es importante conocer el grado de exactitud que otorga este tipo de sistemas y saber cuáles son los márgenes entre los que podemos desenvolvernos con seguridad.



Para la realización de esta revisión y del posterior meta-análisis se han tenido en cuenta aquellos estudios en los que se analiza la exactitud de un determinado sistema de medida como la desviación en sentido horizontal en el punto de entrada del alvéolo o del implante con respecto a la planificación previa. Por tanto, aquellos sistemas que presentan una menor desviación con respecto a la planificación se considera que presentan una mayor exactitud. No han sido considerados para esta revisión aquellos estudios en los que se analiza la exactitud como un valor de la desviación en sentido vertical o en el eje mayor del implante, ni tampoco los datos referentes a la desviación en el ápice del alveolo fresado o del implante.

La desviación media que muestran los estudios es de 0,73 mm en el punto de entrada del alvéolo fresado o del implante. En los estudios seleccionados esa distancia ha sido medida mediante distintos métodos. Lo más habitual es realizar una TC posterior para comparar la posición final de los implantes con la posición inicial prevista, pero existen estudios en los que se realizan mediciones directas sobre modelos o utilizan una máquina de medición por coordenadas.

No existen diferencias estadísticamente significativas al comparar sistemas dinámicos con sistemas estáticos, aunque en general se encuentra una desviación menor en aquellos estudios que valoran sistemas de navegación. La mayor exactitud que parece tener los sistemas de navegación podría explicarse por la utilización de modelos in vitro en la mayoría de los estudios que valoran estos sistemas. Así, en los estudios realizados sobre pacientes, encontramos una desviación media considerablemente mayor en comparación con el resto. La exactitud en los estudios que miden la desviación sobre alveolos fresados es significativamente mayor que en los estudios sobre implantes.

La desviación máxima es un valor a tener en cuenta para establecer el margen de seguridad que tenemos que considerar en la planificación quirúrgica.

Debido a las diferencias en el diseño de los estudios no es posible identificar un sistema superior a otro. Será necesario realizar más estudios clínicos sobretodo en sistemas de navegación.



### 3. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN AVANZADA PARA APLICACIONES MÉDICAS<sup>5</sup>.

#### 3.1. PROTOTIPADO RÁPIDO PARA APLICACIONES MÉDICAS.

##### 3.1.1. ANTECEDENTES DE PROTOTIPADO RÁPIDO.

El prototipado rápido es un término usado para representar una serie de tecnologías que pueden fabricar objetos 3D en una sola etapa, directamente de sus descripciones CAD. Hay una serie de otros términos relacionados con PR (prototipado rápido) que se pueden utilizar para describir la tecnología:

- Fabricación de forma libre. Se destaca el hecho de que el PR es en gran parte “independiente geométricamente” en el que cualquier aumento en la complejidad de la forma, no implica necesariamente que sea más difícil de construir.
- Fabricación automatizada. Enlaza PR con otras tecnologías similares como el mecanizado por control numérico destacando el hecho de que las partes son en gran parte producidas sin la intervención humana. Desde que el PR ha reemplazado las habilidades de fabricación de modelos tradicionales, este método puede considerarse una enorme ventaja en términos de incremento de la velocidad de fabricación, rendimiento y reducción de la demanda de mano de obra cualificada.
- Fabricación aditiva basada en capas. PR simplifica el complejo proceso de fabricación en 3D mediante la reducción en una serie de formas 2D de espesores finitos o capas y sumándolas.

La definición final de fabricación aditiva basada en capas es la clave de cómo trabaja realmente el prototipado rápido. Se crean modelos enlazando capas de material. Si las capas son lo suficientemente delgadas, los modelos se aproximarán al diseño original previsto. Muchos procesos de PR usan espesores de capa del orden de 0,1 mm, lo que parece ser suficiente para adaptarse a muchas aplicaciones. Por lo tanto, PR se está convirtiendo en una tecnología aceptada en el sector de la fabricación, con diferentes industrias (utensilios de cocina, electrónica, juguetes, joyería, automóviles y aeroespacial, etc.) haciendo uso de sus capacidades. El término fabricación “aditiva” también distingue el PR del mecanizado por control numérico, que utiliza un material existente y elimina, o sustrae material, para revelar la forma final. Con el PR se comienza con un solo sustrato y se añade material en capas hasta que la pieza se ha completado.

Las personas familiarizadas con los sistemas de imágenes médicas entienden fácilmente el concepto básico de funcionamiento del prototipado rápido. Sistemas de imágenes como la tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM), funcionan de una manera similar. Se construyen imágenes 3D de datos de los pacientes combinando rebanadas 2D tomadas de los

<sup>5</sup> Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications; Gibson, Ian.



sistemas de sensores e interpolando entre ellos. En general, la separación entre rebanadas es bastante grande en comparación con las máquinas de PR, aunque la mejora de sensores y técnicas permiten aumentar la precisión de los modelos creados. Por lo tanto, en esencia, los dos procesos son muy similares. La TC y la RM combinan mediante software, las rebanadas para crear un modelo 3D, y el PR toma un modelo 3D y lo reproduce en una forma física mediante la combinación de capas.

Hay muchas maneras diferentes de hacer las capas de la pieza, y por lo tanto, hay muchas diferentes máquinas de PR y fabricantes. Sin embargo, también hay que señalar que la tecnología de PR tiene muchas limitaciones, enunciando a continuación las más comunes:

- Espesor de la capa.
- Precisión de la pieza.
- Tamaño de la pieza.
- Materiales.
- Resistencia de la pieza.
- Velocidad.
- Coste.

### 3.1.2. PREPARACIÓN DEL ARCHIVO.

Como se ha especificado, el prototipado rápido es una tecnología para convertir sólidos 3D modelados, virtuales, archivos CAD, en modelos físicos. Puesto que hay muchos tipos diferentes de formatos de archivos CAD, es necesario convertirlos para que la máquina de prototipado rápido pueda leerlos. Casi todas las máquinas de PR utilizan el mismo archivo de entrada para los archivos del modelo. Después del proceso de estereolitografía se obtiene un archivo en formato STL. Los archivos STL son aproximaciones de la superficie de los modelos sólidos generados en el sistema de CAD. La aproximación se realiza mediante la formación de superficies cerradas con triángulos planos. Si los triángulos son muy pequeños, la malla superficial puede ser muy precisa, aunque para superficies curvas y de forma libre (como los modelos médicos), el tamaño del archivo puede ser muy grande.

### 3.1.3. RELACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS.

Es importante mencionar que el prototipado rápido sólo es posible con el apoyo de otras tecnologías. De hecho, es necesario generar el modelo por ordenador, y por lo tanto, los avances del CAD/CAM son muy importantes para el desarrollo del PR. Esta cuestión es particularmente relevante para modelos médicos, porque las fuentes de datos del modelo pueden ser múltiples. De manera general, los modelos médicos provienen de los datos del paciente a través de la tomografía computarizada (TC, esencialmente datos 3D de rayos X que se utilizan particularmente para el tejido óseo), resonancia magnética (RM, utilizada para generar imágenes de las regiones de tejidos blandos), imágenes por ultrasonidos, etc. Hay variantes de estos métodos, y de hecho, las imágenes se pueden combinar de diferentes fuentes. Además, los modelos CAD convencionales de ingeniería también se pueden combinar con estos datos para producir los diseños para los implantes, herramientas y accesorios.



Uno de los beneficios del PR es que las tecnologías se pueden utilizar en distintas etapas del desarrollo del producto. Es una ayuda para la conceptualización, pero también se puede utilizar para generar diseños detallados y modelos de prueba, e incluso para la producción. No todas las máquinas de PR pueden ser usadas de la misma manera y algunas son menos versátiles que otras. Además, es importante darse cuenta de que no se utilizan de forma aislada, sino en conjunción con otras tecnologías, como la colada en vacío, estampación por pulverización e inyección de moldes. También se requiere una habilidad considerable para operar estas tecnologías de forma eficaz, con el requisito de producir con un buen acabado superficial y de apariencia del modelo mientras se mantiene la precisión.

### **3.1.4. DESVENTAJAS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO PARA APLICACIONES MÉDICAS.**

Como se conoce, el prototipado rápido no ha sido desarrollado para resolver los problemas de los modelos médicos. De ello se deduce que el PR no es una solución ideal y hay problemas en usarlo.

El problema más obvio es el coste. Es difícil especialmente asignar costes a un proceso cuando se considera la posibilidad de salvar o mejorar la calidad de vida, pero es evidente que todas las tecnologías tienen costes asociados. Aun cuando existen beneficios obvios en términos de mejorar el servicio médico, el método puede tener un costo prohibitivo. Muchas máquinas de PR tienen grandes costes de funcionamiento, sobre todo en términos de costes de las materias. Esto es en parte, a consecuencia del número relativamente bajo de las máquinas disponibles en la actualidad. A medida que la tecnología se vuelva más popular en todas las áreas, los costes de operación seguramente caerán. De hecho, la evidencia muestra ya que los costes operativos se han reducido de forma sostenida año tras año durante los últimos 20 años.

Además del coste, las propiedades de los materiales utilizados dejan mucho que desear. Los materiales empleados en PR deben ser mucho más biocompatibles de lo que son en la actualidad. Muchos materiales no están aún en condiciones de ser esterilizados y empleados en quirófanos. Las propiedades mecánicas de la mayor parte de las piezas fabricadas por PR son generalmente pobres, con zonas a menudo demasiado débiles o frágiles para soportar un uso constante. Uno de los objetivos de la investigación en PR es el desarrollo de las tecnologías de fabricación rápida que usan la aproximación basada en capas para la fabricación directa de productos. Con el exigente entorno que se asocia con el uso constante, condiciones duras y variables y cargas físicas pesadas, todavía queda un largo camino antes de la posible fabricación rápida de dispositivos médicos.

## **3.2. APLICACIONES QUIRÚRGICAS DE REALIDAD VIRTUAL.**

### **3.2.1. BIOMODELADO CRANEO-MAXILOFACIAL.**

La complejidad de la anatomía cráneo-maxilofacial combinada con la variación morfológica a la que se enfrenta el cirujano reconstructivo hace a la cirugía cráneo-maxilofacial una tarea difícil en la explicación conceptual, planificación y ejecución. La necesidad de una



comprensión morfológica clara en la cirugía, juega un papel importante en el desarrollo tanto de las imágenes en 3D, como en el biomodelo sólido.

Los cirujanos cráneo-maxilofaciales han demostrado un alto nivel de afinidad por el biomodelado, tal vez, porque utilizan habitualmente moldes dentales y modelos articulados producidos a partir de moldes. El uso de biomodelos de la mandíbula y el maxilar es una extensión natural del uso de estos moldes dentales. Los biomodelos han sido de usados comúnmente para mejorar la relevancia del diagnóstico de los datos y para la simulación quirúrgica.

### 3.2.1.1. INTEGRACIÓN DE BIOMODELOS CON MOLDES DENTALES.

La combinación de moldes dentales (copiado de los dientes) con biomodelos (copiado de las mandíbulas) puede ser ventajoso por las siguientes razones:

- La presencia de partes metálicas en los empastes y aparatos dentales se traduce en un biomodelo que puede dar lugar a imprecisiones inaceptables. El escaneo en planos horizontales de la tomografía computarizada sobre la pieza, puede minimizar el número de planos en los que se produce distorsión de la imagen, pero puede no ser suficiente.
- La precisión del escaneo de la TC incluso en alta resolución puede no ser suficiente para el biomodelado de los dientes opuestos para formar una mordedura oclusiva verdaderamente precisa.

El molde dental tradicional de yeso crea un modelo de los dientes de alta precisión y relativamente barato. Una combinación de estos moldes con un biomodelado de la mandíbula y del maxilar forma un híbrido de alta precisión con beneficios considerables.

### 3.2.1.2. USO DE BIOMODELOS PARA DAR FORMA A IMPLANTES MAXILOFACIALES

Los biomodelos se pueden utilizar de varias maneras para dar forma a las prótesis maxilofaciales. Una manera simple de hacer esto es utilizar el biomodelo como una plantilla en la que un injerto da forma directamente durante la cirugía. El injerto de hueso se puede recoger desde la cresta ilíaca y formándose directamente sobre el biomodelo esterilizado. Una vez que el contorno es satisfactorio, el cirujano coloca el injerto en su posición y lo fija.

### 3.2.1.3. USO DE BIOMODELOS PARA PREFABRICAR PLANTILLAS Y FÉRULAS.

Los biomodelos se pueden utilizar para planificar la cirugía endoósea y crear plantillas personalizadas de guías de broca. Los pacientes edéntulos pueden recuperar sus dientes montándolos sobre pernos de titanio que se implantan en la mandíbula. Sin embargo, la implantación de los pernos de titanio es difícil y complicada por el posible daño al nervio dentario inferior. Los biomodelos mandibulares copian con exactitud el canal neurovascular a través del cual transita el nervio mandibular. El curso de este nervio se puede mostrar fácilmente pasando un alambre maleable de color a lo largo del canal neurovascular o copiándolo en un segundo color usando la resina StereoCol. El biomodelo se puede utilizar para determinar y ensayar la colocación y profundidad de los orificios necesarios dónde ubicar los pernos de montaje de titanio usando un taladro dental estándar. Los pernos se insertan en su posición con un moldeado acrílico de curado frío alrededor de ellos y del contorno mandibular para formar una guía de broca reubicable. La profundidad de cada agujero también se puede determinar relacionando la guía del taladro y la



posición de registro. Durante la cirugía, la mucosa se elimina de la mandíbula y la guía de la broca se une mediante los contornos recíprocos. Mientras se encuentre firmemente en su lugar, la guía puede ser utilizada para perforar los agujeros con la colocación y profundidad correcta, como se planifica de antemano en el biomodelo sin riesgo de lesión del nervio mandibular inferior. Más recientemente, el software SimPlant se utiliza antes de la operación para simular la colocación de implantes en un entorno virtual, y posteriormente, el prototipado rápido es utilizado para generar un biomodelo de la mandíbula, así como una plantilla personalizada de la guía de perforación.

Las férulas dentales pueden ser prefabricadas con biomodelos articulados de los dientes y las mandíbulas. Estas férulas pueden ser útiles para mantener la posición relativa de los arcos dentales después de la cirugía de osteotomía. La cirugía se ensaya sobre el biomodelo para determinar y regular la posición relativa de los huesos. Asimismo, una férula puede entonces ser moldeada para adaptarse al biomodelo reconstruido. Al final de la cirugía, la férula puede entonces, ser utilizada para mantener la posición. El riesgo de los movimientos óseos mientras se moldea la férula directamente, también se evita con esta técnica.

#### **3.2.1.4. USO DE BIOMODELOS EN PRÓTESIS DE RECONSTRUCCIÓN.**

Otro uso de biomodelos en cirugía maxilofacial es la prefabricación de las prótesis de restauración. Por lo general, la cirugía requiere de implantes fijadores de titanio que se insertan en la que se monta la prótesis. Se puede utilizar un biomodelo para determinar la mejor ubicación de estos implantes y para la construcción de la prótesis que los cubre.

### **3.3. SOFTWARE PARA LA TRANSFERENCIA DE DATOS MÉDICOS.**

Se pueden definir dos enfoques diferentes para una eficaz planificación quirúrgica en 3D de la cirugía de los tejidos duros. Una primera aproximación es la planificación en un modelo físico de los huesos. Los modelos físicos se basan en la información de la tomografía computarizada y se producen por medio de técnicas de prototipado rápido. En los modelos físicos se pueden ensayar acciones quirúrgicas. En el caso de las intervenciones que requieren implantes a medida, los implantes se pueden diseñar en el modelo físico. Una alternativa para este enfoque es trabajar directamente sobre el modelo computarizado.

Ambos enfoques requieren un tratamiento preparatorio de tomografía computarizada y/o resonancia magnética mediante un software de imágenes médicas especializado.

#### **3.3.1. MIMICS.**

El sistema de control de imagen médica interactivo de Materialise (Mimics) es una herramienta interactiva para la visualización y la segmentación de imágenes de la tomografía computarizada así como las imágenes de la resonancia magnética y la representación 3D de los objetos. Por lo tanto, en el campo de la medicina, Mimics se puede utilizar para diagnóstico, planificación de la operación o con fines de ensayo. Se incluye una interfaz muy flexible para sistemas de prototipado rápido para la construcción de objetos de segmentación distintivos.

Los módulos adicionales dispone la interfaz hacia el prototipado rápido utilizando STL o directamente con el apoyo de formatos de capa. Por otra parte, se dispone de una interfaz de



CAD (diseño de prótesis a medida y nuevas líneas de productos basados en datos de imagen) o de mallas de elementos finitos.

### 3.3.2. SIMPLANT.

El software SimPlant, software para el modelado 3D y la planificación de implantes basado en 3D interactivo, hace posible la creación de un entorno de planificación completa desde las imágenes de la tomografía computarizada mediante el cambio de formato del conjunto de datos (secciones, imagen panorámica) y visualización en 3D. El siguiente paso crucial en la colocación del implante es la transferencia desde la planificación preoperatoria al campo quirúrgico. Es necesaria una transferencia precisa de la planificación del tratamiento para obtener el resultado deseado. Las guías de perforación personalizadas están diseñadas para ajustarse perfectamente a la irregularidad de la mandíbula. La forma irregular de la mandíbula asegura un posicionamiento estable y único de la guía de perforación, necesaria para disponer una transferencia precisa de la planificación.

Un estudio de tomografía computarizada SimPlant crea un entorno de planificación completo, permitiendo la visualización simultánea de la sección transversal, axial, panorámica e imágenes 3D en un entorno interactivo. De este, se puede planear con confianza los escenarios de la planificación del tratamiento para asegurar una colocación del implante óptima.

Se incluyen una variedad de herramientas de medición y simulación para ayudar a establecer el plan. SimPlant da acceso a la información sobre la densidad ósea, las mediciones, el volumen de los senos del injerto, las fuerzas de agarre y mucho más. Varias herramientas están disponibles para visualizar las estructuras vitales como el canal del nervio alveolar (dentario). Los implantes virtuales se pueden insertar y evaluar en su totalidad. Con SimPlant, el número exacto de los implantes que se colocan y su posición, el tamaño y los pilares se conocerán prequirúrgicamente.



## 4. FÉRULAS<sup>67</sup>.

### 4.1. TIPOS DE FÉRULAS GUÍADAS, ELECCIÓN DEL TRATAMIENTO.

#### 4.1.1. FÉRULAS MUCOSOPORTADAS

Ideal para el desdentado total con buenas condiciones óseas y gingivales ya que se trata de una cirugía mínimamente invasiva. Precisa de una férula radiológica radiopaca y un correcto posicionamiento para la cirugía (ceras de mordida) ya que la cirugía es a cielo cerrado.



#### 4.1.2. FÉRULAS OSEOSOPORTADA.

Apropiada para los casos de desdentado total o parcial en los que se necesite más visibilidad, pudiéndose realizar tratamientos de regeneración ósea y gingival ya que la cirugía se realiza a cielo abierto.



<sup>6</sup> Cirugía guiada: Impresiones clínicas propias; I Congreso dental aragonés; Loscos Morató, Fernando.

<sup>7</sup> SimPlant SurgiGuide Cookbook; Materialise Medical.



#### 4.1.3. FÉRULAS DENTOSOPORTADA.

Recomendada para los casos de desdentado parcial o unitarios en los que se precise una cirugía mínimamente invasiva. Puede ser a cielo abierto o cerrado.



#### 4.2. TEMPERATURA DE FRESCO.

El incremento de la temperatura usando fresas BTI (marca comercial) a bajas revoluciones, es de 2° a 3° respecto a la temperatura ambiente. Siendo este incremento de temperatura irrelevante desde el punto de vista de la viabilidad celular y además nos hace pensar que las paredes óseas del nuevo alveolo creado se encuentra en las mejores condiciones biológicas para acoger el implante.

#### 4.3. CONCLUSIONES CLÍNICAS.

Los sistemas dentosoportados y oseosoportados son los más seguros a la hora de fijar la férula de manera correcta en contra de los mucosoportados (sobre todo los inferiores).

La fijación de manera inadecuada de la férula puede ocasionar problemas importantes funcionales y fracaso de los implantes. Probablemente la fijación en oclusión con cera de mordida sea el mejor (al igual que las férula radiográficas en el escáner).

Los sistemas de fijación de la férula roscados pueden movilizar la férula mucosoportada ya que es difícil determinar el tope en desdentados totales y férulas mucosoportadas. La isquemia de la mucosa puede indicar exceso de presión. Mejor pins de fijación (sin rosca) con tope pero sin presión.

En cuanto a la refrigeración, se propone fresar a 50 r.p.m. con irrigación máxima y con irrigación interna.



# 5. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN. INTERFAZ DE TRABAJO.

---

El punto de partida del presente Trabajo Fin de Máster, es el desarrollo de un algoritmo de optimización de la posición de los implantes (y por ende, de la guías de fresado de la férulas) para cirugía guiada en implantología dental a través del entorno matemático de MATLAB. Asimismo, se crea una interfaz visual, para facilitar su utilización.

El algoritmo de optimización trabajará con nubes de puntos y efectuará dichas optimizaciones de acuerdo a:

- Diagrama de Voronoi: establecerá para cada capa de trabajo un nuevo punto del eje del implante de manera que equidiste de los puntos restantes de las paredes de la mandíbula.
- Optimización del eje de implante: partiendo del eje del implante planificado inicialmente definido por un vector de 6 componentes que contiene las tres coordenadas x,y,z de su punto base y las tres coordenadas i,j,k que definen su vector dirección, se obtiene un nuevo vector del implante que ha definido una nueva dirección que minimiza la diferencia total por capa entre cada punto del eje y la distancia al punto más próximo de la pared de la mandíbula.

Para un mismo proyecto, se realizará ambas optimizaciones y se realizan comparaciones entre ellas y la planificación inicial del dentista, comparando parámetros de interés. Los datos de entrada al algoritmo serán nubes de puntos en diferentes capas definidas mediante archivos obtenidos a través de Magics desde el modelo 3D inicial de una tomografía computarizada.

## 5.1. DATOS DEL PROYECTO MÉDICO ESTUDIADO.

Se indican a continuación los datos del proyecto médico estudiado que son necesarios para lanzar los procedimientos de optimización. El caso de estudio consiste en la optimización de una planificación inicial de 2 implantes en la mandíbula inferior.

Cada uno de los implantes tiene un radio diferente, las capas límites empleadas en la optimización son aquellas donde se puede observar de manera completa el implante y no hay otras interferencias como la zona superior de la mandíbula de formas más irregulares. Asimismo, debido a la irregularidad de la mandíbula, para cada implante, se define una región de optimización diferente a su alrededor. Dicha región es utilizada por el algoritmo para calcular gráficos posteriores o en la optimización según el diagrama de Voronoi para seleccionar puntos de las paredes de la mandíbula.



### 5.1.1. IMPLANTE 1.

- Radio implante: 2 mm.
- Longitud implante: 10 mm.
- Capas empleadas para la optimización: 113-190
- Radio región de optimización: 8 mm.

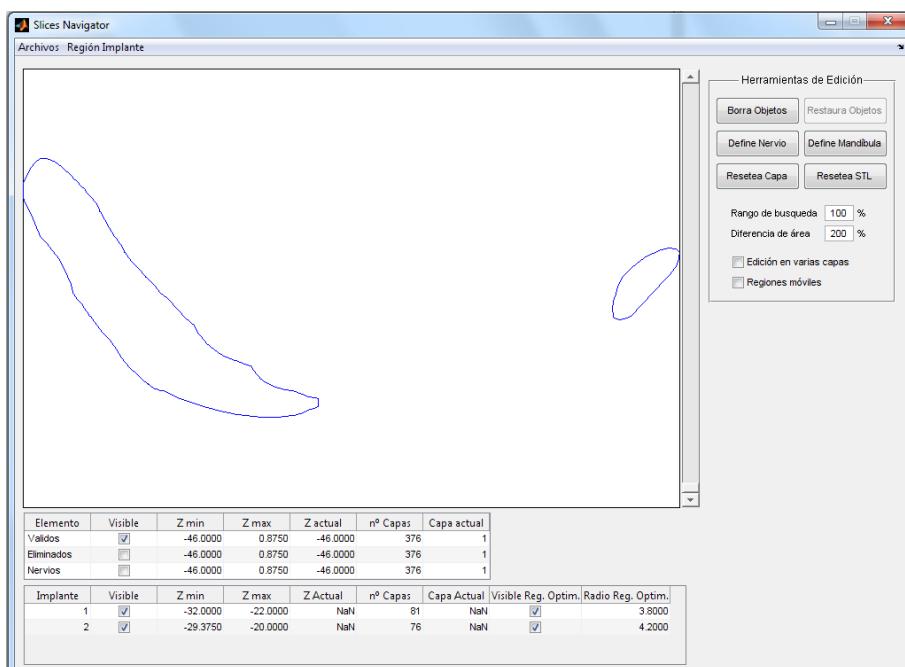
### 5.1.2. IMPLANTE 2.

- Radio implante: 2,2 mm.
- Longitud implante: 9 mm.
- Capas empleadas para la optimización: 134-190
- Radio región de optimización: 8,5 mm.

## 5.2. MANUAL DEL PROGRAMA.

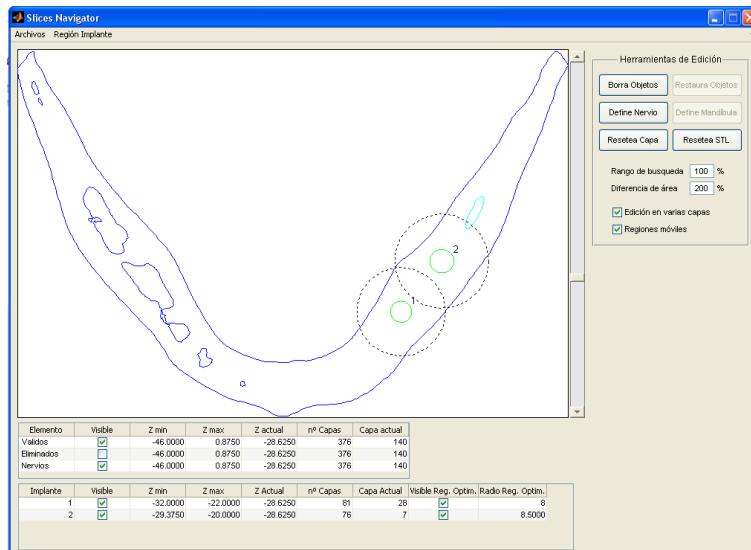
Para realizar una optimización completa sobre el caso de estudio especificado de 2 implantes se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir MATLAB.
2. Seleccionar el directorio donde se encuentra el programa.
3. Ejecutar la aplicación:
  - a. Slicesnavigator.m > Run File.
4. Una vez dentro de la interfaz del programa, cargar archivos:
  - a. Menú > Archivos > Carga mandibula > SIMON\_Mandible.mat
  - b. Menú > Archivos > Carga Implantes > SIMON\_Implante 1.mat
  - c. Menú > Archivos > Carga Implantes > SIMON\_Implante 2.mat





5. Configurar las capas offset:
  - a. Menú > Región Implante > Capas Límite > Offset capa inferior > 25
  - b. Menú > Región Implante > Capas Límite > Offset capa superior > 25
6. Activar “Regiones móviles”.
7. Activar “Edición en varias capas”.
8. Seleccionar aquellas nubes de puntos de “ruido” en zonas próximas al implante (se mostrarán en rojo) y borrarlos y guardarlos en un archivo .MAT:
  - a. Botón > Borra Objetos
  - b. Archivos > Guarda Elementos Eliminados
9. Radio region opt >8 (implante 1).
10. Radio región opt > 8.5 (implante 2).
11. Seleccionar aquellas nubes de puntos que definen al nervio maxilar inferior (se mostrarán en azul) y guardarlos en un nuevo archivo .MAT que se cargará en la interfaz:
  - a. Archivos > Guarda Nervio
  - b. Archivos > Carga Nervio
12. Finalmente, debido a las modificaciones realizadas en el archivo de la mandíbula, al borrar puntos y definir el nervio, se guardan las capas de nubes de puntos de la mandíbula en un nuevo archivo .MAT:
  - a. Archivos > Guarda Mandíbula
13. Imagen antes de proceder con otros análisis:



A continuación se realizan las optimizaciones desarrolladas en el algoritmo, eligiendo cada uno de los implantes por separado. En el apartado “Anejos a la memoria” se encuentra una comparativa entre los resultados obtenidos por ambos métodos de optimización respecto a la planificación inicial del dentista.

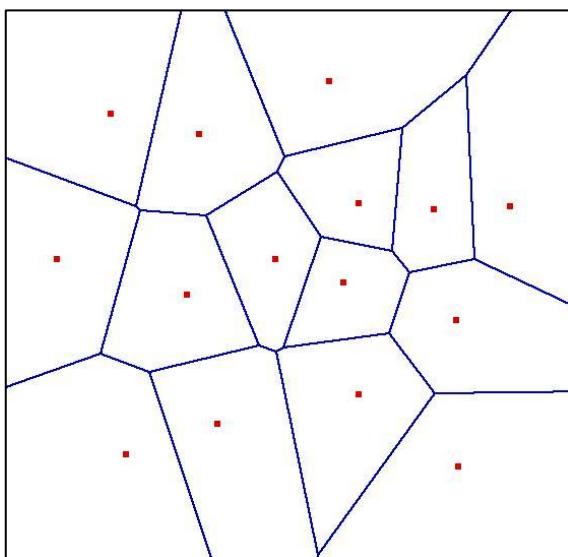


### 5.2.1. OPTIMIZACIÓN SEGÚN DIAGRAMA DE VORONOI.

El diagrama de Voronoi es una de las estructuras clásicas en Geometría Computacional (disciplina encargada de resolver problemas geométricos mediante métodos algorítmicos). Se conoce con distintos nombres: diagrama de Voronoi, polígonos de Thiessen, regiones de Wigner-Seitz, etc., debido a que ha sido estudiado varias veces a lo largo de la historia.

En síntesis, se parte de un conjunto de puntos en el plano y se hace una partición del plano en regiones, de modo que cada región contiene a un único punto y a su vez, todos los puntos integrados en esa región están más cerca de ese punto inicial que de cualquier otro del plano. Asimismo, cada uno de los vértices generados por la unión de los diferentes segmentos de los polígonos de Voronoi, equidistan de 3 puntos cercanos.

De manera más precisa: dado un conjunto  $S$  de generadores (puntos) en el plano, el diagrama de Voronoi de  $S$  es la teselación (partición) del plano tal que a cada punto de  $S$  le asigna la región formada por los puntos del plano que están más cerca suyo que de cualquier otro elemento de  $S$ . Gráficamente, diagrama de Voronoi compuesto por los polígonos de Voronoi que contienen cada uno, a un único generador (punto):



Específicamente para el algoritmo desarrollado en el presente Trabajo Fin de Máster, se aplica el diagrama de Voronoi en cada una de las capas en las que se ha dividido previamente la mandíbula. De cada capa se emplean para el cálculo todos los puntos que están dentro de la región de optimización definida en la interfaz, que a su vez se subdividen en aquellos puntos que representan la pared exterior e interior de la mandíbula.

Desde la interfaz creada, se lanza el procedimiento de optimización obteniendo de esta manera una serie de puntos nuevos que se corresponden con los vértices de los diferentes polígonos de Voronoi generados. De todos esos puntos, el algoritmo selecciona como nuevo punto del eje del implante optimizado que intersecta con la capa correspondiente, aquel que se encuentra más próximo al punto inicial del eje del implante en dicha capa.

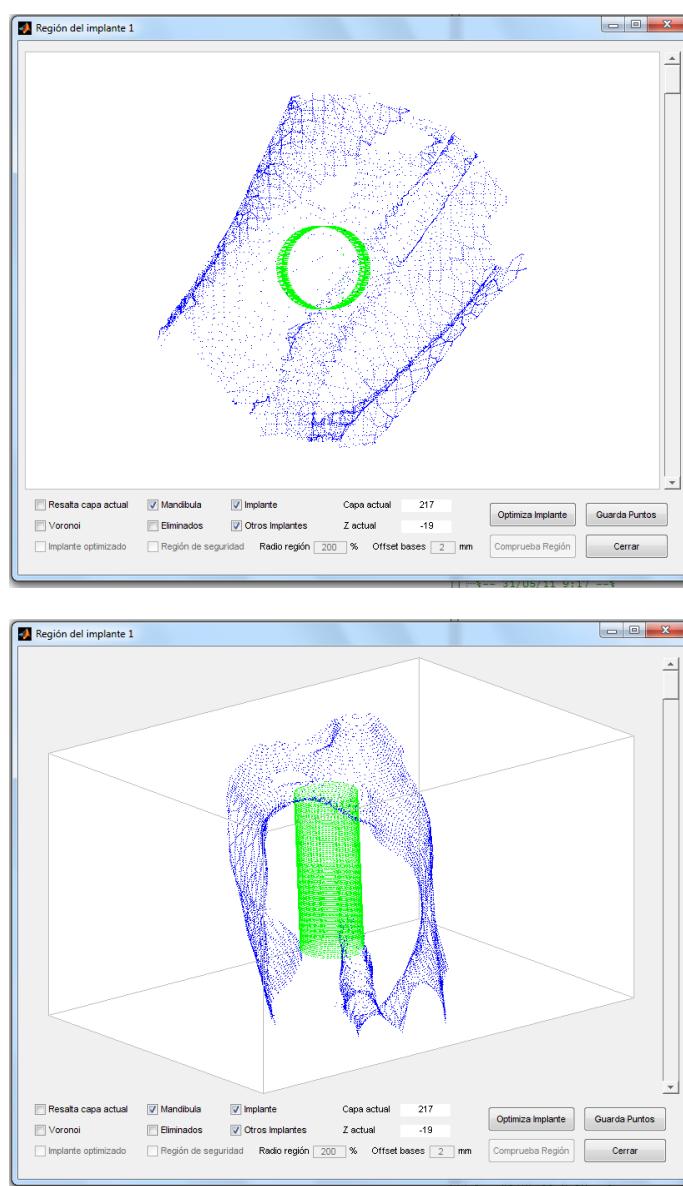


Finalmente, el nuevo eje del implante optimizado, es calculado por el método de mínimos cuadrados a partir de todos los puntos optimizados en cada capa mediante el diagrama de Voronoi.

El objetivo del uso del diagrama de Voronoi para realizar las optimizaciones sobre la posición del eje del implante es obtener una nueva posición para el implante de manera que tenga el mayor volumen de hueso disponible alrededor.

### IMPLANTE 1.

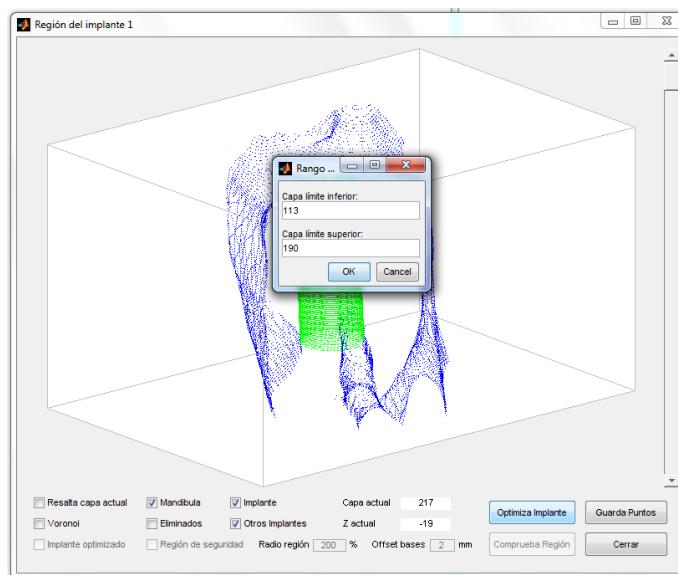
1. Menú > Región Implante > Exporta Implante > 1
  - a. Se muestra la siguiente pantalla:





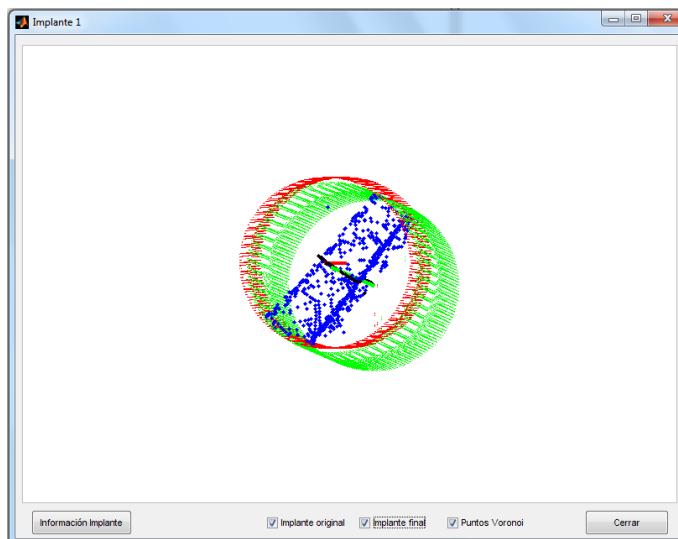
2. Optimiza Implante:

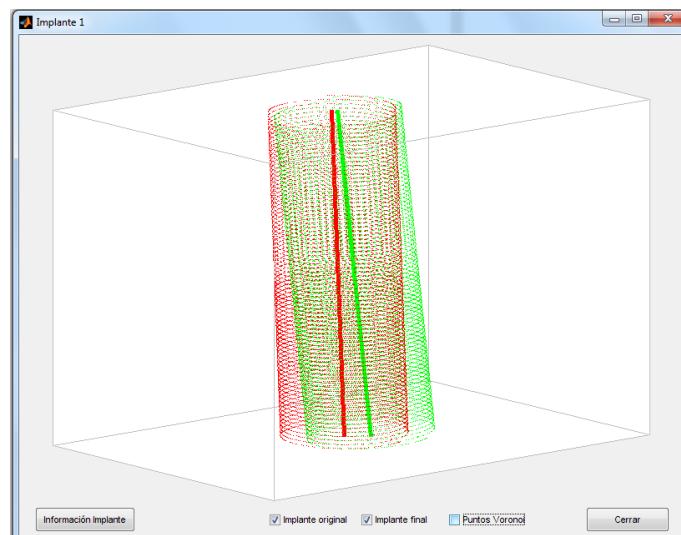
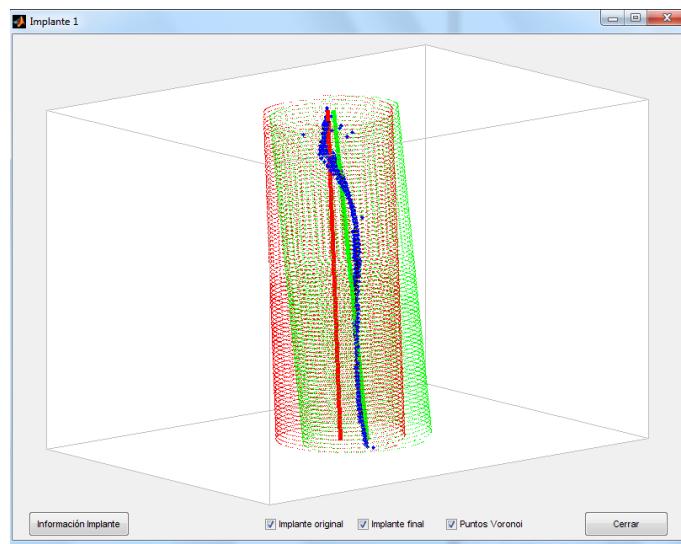
- a. Para el implante 1, se seleccionan las capas entre la 113 y la 190, inclusive.



3. Los colores se corresponden de la siguiente manera:

- Implante original: rojo
- Implante final: verde
- Puntos Voronoi: azul





#### 4. Información Implante

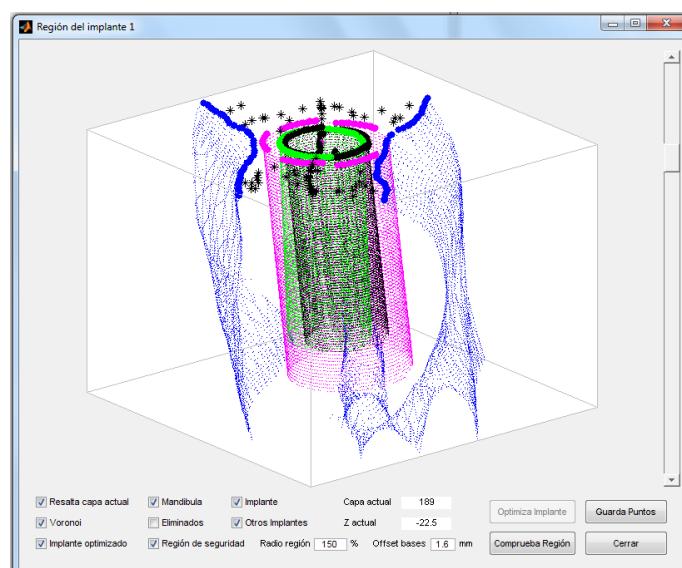
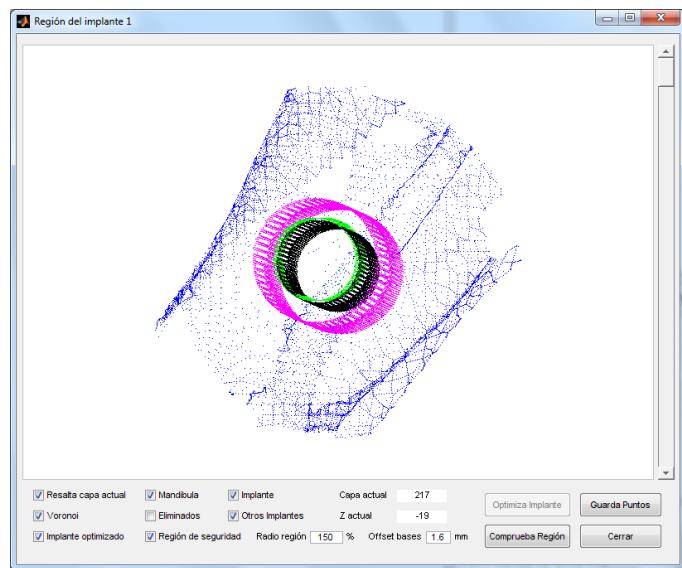
Aproximación del eje		Rototraslación del eje		Límites de trabajo	
nº puntos	75	Desplaz. en X (mm)	0.3834	nº capas	78
Error mín. (mm)	0.0094	Desplaz. en Y (mm)	-0.2998	Capa inferior	113
Error medio (mm)	0.1656	Desplaz. en Z (mm)	0	Capa superior	190
Error máx. (mm)	0.4655	Giro en X (º)	2.3843	Z inferior (mm)	-32.0000
STD	0.1078	Giro en Y (º)	2.6641	Z superior (mm)	-22.3750
		Giro en Z (º)	0.1712		

Distancias de la mandíbula a los centros de los implantes (mm)						
Altura z	D.real 1	D.real 2	Dif. real	D.optim. 1	D.optim. 2	Dif. optim.
-22.3750	2.8012	2.8834	0.0823	2.6080	3.0790	0.4710
-22.5000	2.9199	3.0827	0.1629	2.7199	3.2861	0.5662
-22.6250	3.0414	3.2790	0.2377	2.8351	3.4903	0.6552
-22.7500	3.1649	3.4328	0.2680	2.9533	3.6520	0.6987
-22.8750	3.2921	3.6030	0.3109	3.0740	3.8301	0.7561
-23.0000	3.4204	3.7649	0.3446	3.3447	4.1275	0.7828
-23.1250	3.5825	3.8869	0.3044	3.3447	4.1275	0.7828
-23.2500	3.7462	3.9593	0.2140	3.5015	4.2094	0.7080
-23.3750	3.9282	4.0169	0.0886	3.6770	4.2745	0.5975
-23.5000	4.0755	4.1190	0.0435	3.8587	4.3404	0.4817
-23.6250	4.1351	4.3116	0.1765	4.0425	4.4072	0.3648
-23.7500	4.1955	4.5057	0.3102	4.2279	4.4748	0.2469
Mínimo	2.8012	2.8834	0.0435	2.6080	3.0790	0.0038
Media	4.4201	5.4727	1.0525	4.7900	5.1115	0.3215
Maximo	4.6892	6.0462	1.8559	5.2921	5.5742	0.8033
Desv.Est.	0.4405	0.8088	0.4104	0.6778	0.5724	0.2111

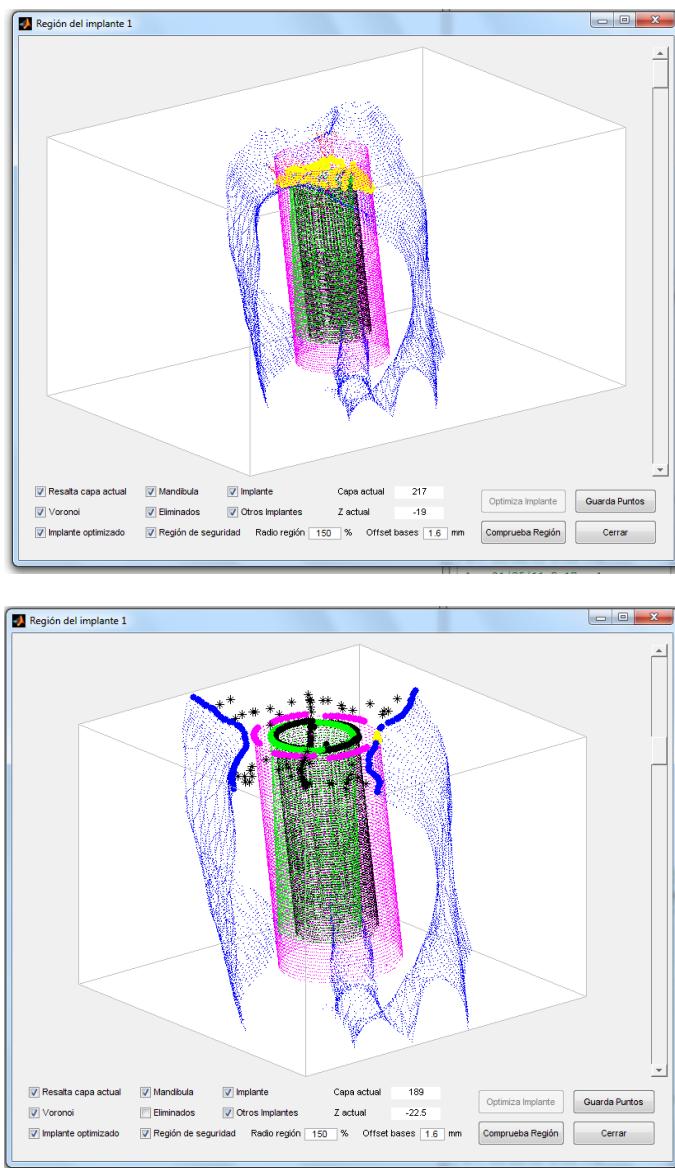


5. Volviendo a la pantalla anterior de “Región del implante 1”:
  - a. Radio región > 150%
  - b. Offset bases > 1,6
6. Los colores se corresponden de la siguiente manera:
  - a. Implante: verde
  - b. Implante optimizado: negro
  - c. Región seguridad: violeta





## 7. Comprueba Región:

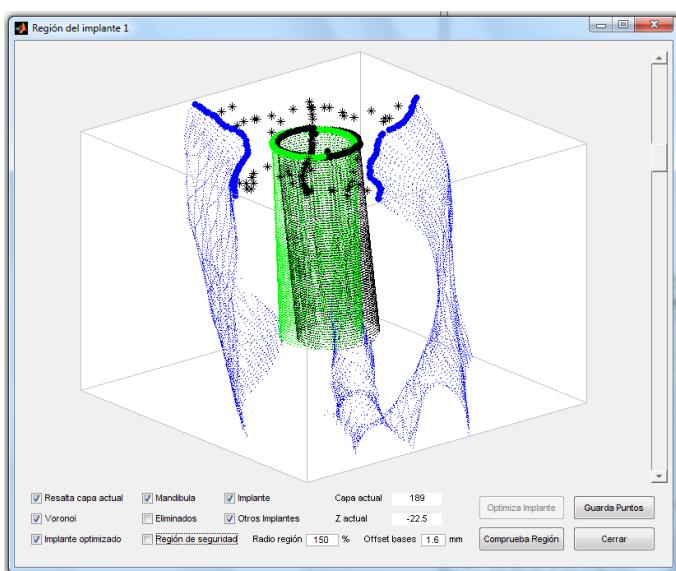
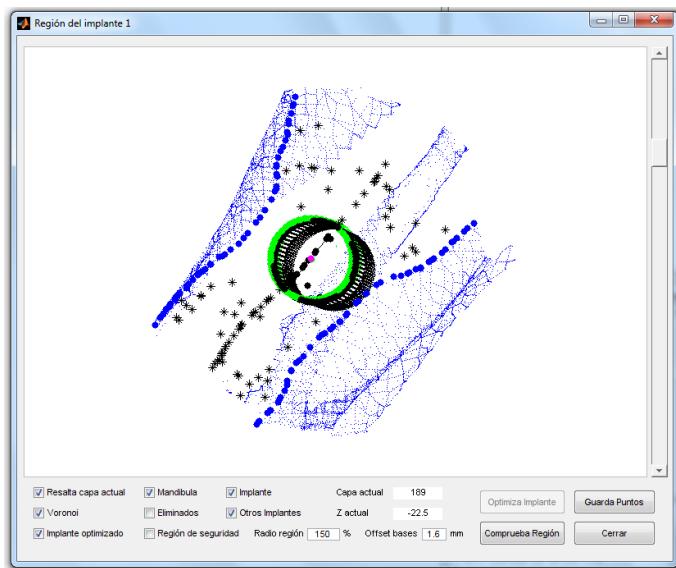


## 8. Conclusiones:

- La zona superior no es de estudio, es importante la inferior donde circula el nervio dentario inferior.
- Con offset bases 1.6, todo correcto. A partir de ese valor, nervio y región de seguridad inferior coinciden.



9. Capa 189 con detalle de puntos Voronoi:



10. Guarda puntos.

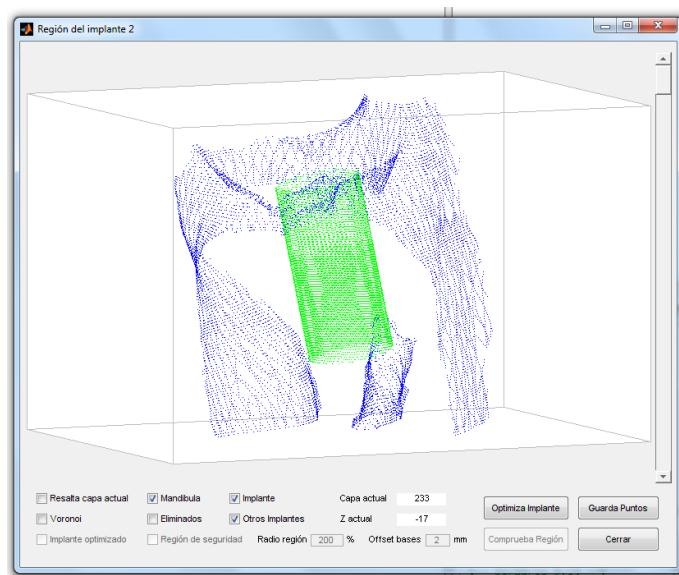
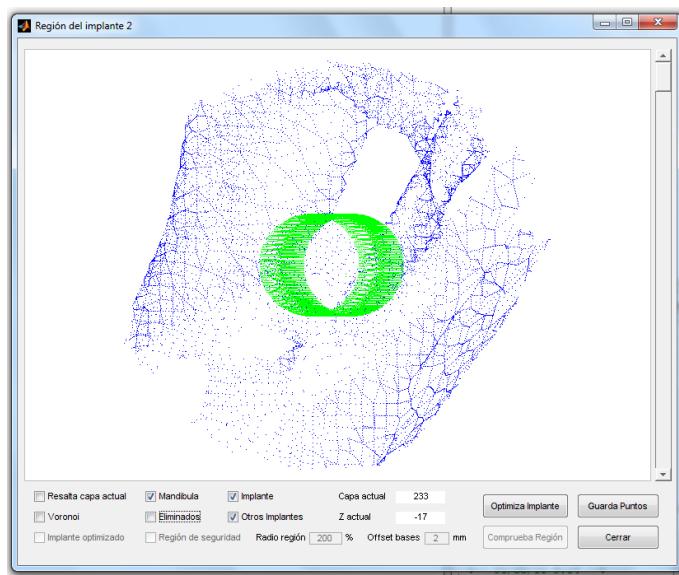
- Se exportan diferentes ficheros de texto .TXT con puntos: optimización según el diagrama de Voronoi, mandíbula, implante inicial, nervio y puntos eliminados.
- Igualmente, el algoritmo genera un fichero de texto .TXT, con los puntos del implante optimizado. Este archivo de texto será importado en Geomagic Qualify para construir el modelo de la férula.



## IMPLANTE 2

1. Menú > Región Implante > Exporta Implante > 2

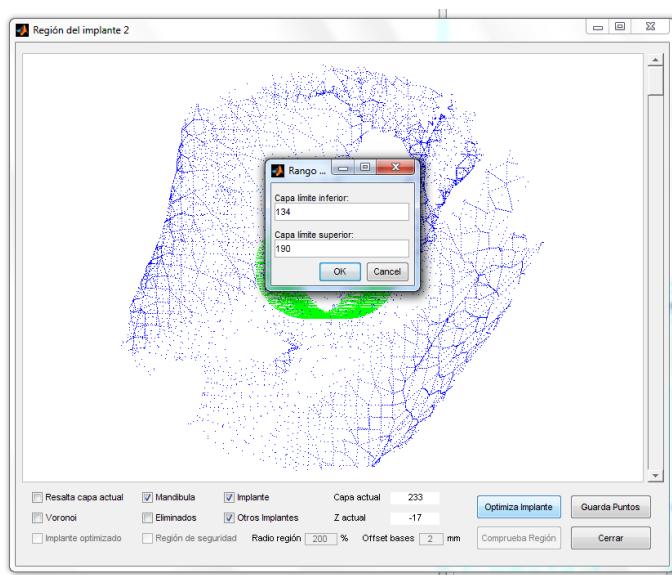
a. Se muestra la siguiente pantalla:





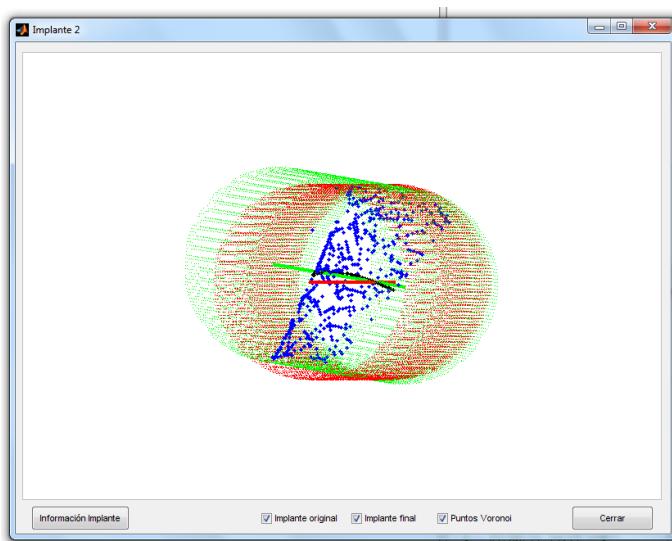
## 2. Optimiza Implante

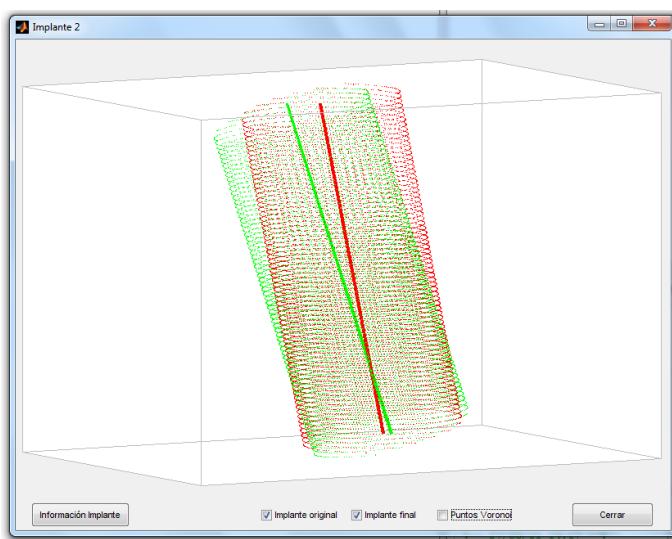
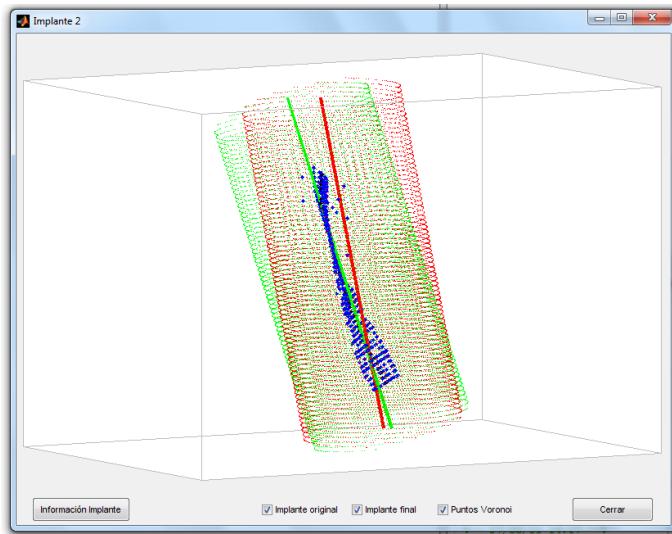
- Para el implante 2, se seleccionan las capas entre la 134 y la 190, inclusive.
- Entre las capa 134 y la 145, el nervio está dentro de la región de búsqueda.



## 3. Los colores se corresponden de la siguiente manera:

- Implante original: rojo
- Implante final: verde
- Puntos Voronoi: azul



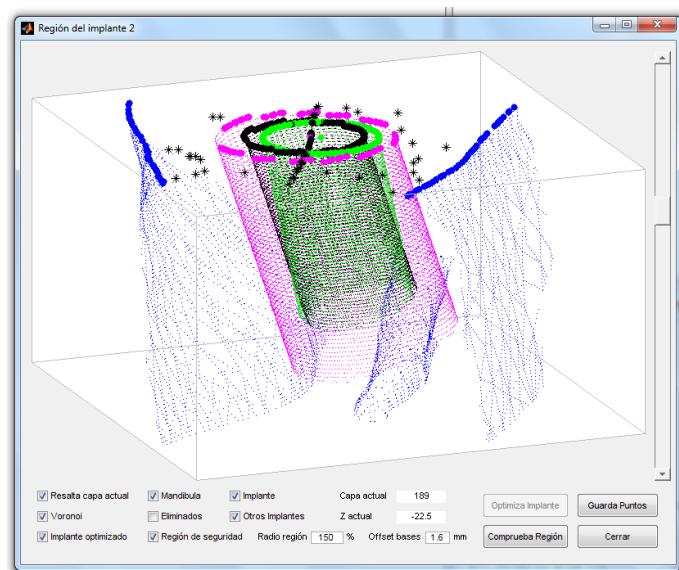
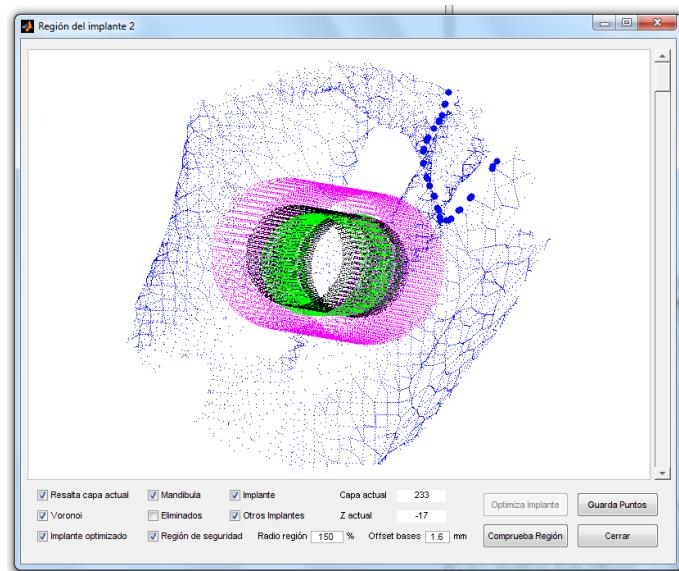


#### 4. Información Implante:

Aproximación del eje		Rototraslación del eje		Límites de trabajo	
nº puntos	43	Desplaz. en X (mm)	-0.2831	nº capas	57
Error mín. (mm)	0.0109	Desplaz. en Y (mm)	0.1436	Capa inferior	134
Error medio (mm)	0.0879	Desplaz. en Z (mm)	0	Capa superior	190
Error máx. (mm)	0.2334	Giro en X (º)	3.0254	Z inferior (mm)	-29.3750
STD	0.0547	Giro en Y (º)	5.9147	Z superior (mm)	-22.3750
		Giro en Z (º)	0.7695		
Distancias de la mandíbula a los centros de los implantes (mm)					
Altura z	D.real 1	D.real 2	Dif. real	D.optim. 1	D.optim. 2
-22.3750	5.7982	6.4557	0.6374	5.8740	6.4216
-22.5000	5.7781	6.5411	0.7629	5.9829	6.3493
-22.6250	5.7585	6.5878	0.8292	6.0419	6.3137
-22.7500	5.7392	6.6373	0.8982	6.1036	6.2785
-22.8750	5.7205	6.6887	0.9682	6.1686	6.2439
-23.0000	5.7020	6.7327	0.9766	6.2432	6.2474
-23.1250	5.7240	6.7132	0.9691	6.2084	6.2324
-23.2500	5.7561	6.7327	0.9766	6.2432	6.2474
-23.3750	5.7906	6.7522	0.9615	6.2649	6.2781
-23.5000	5.8228	6.7715	0.9487	6.2849	6.3128
-23.6250	5.8543	6.7915	0.9372	6.2989	6.3476
-23.7500	5.8861	6.8107	0.9246	6.3126	6.3825
Mínimo	2.8552	4.2264	0.0025	4.3242	4.9459
Media	5.6008	6.3746	0.7738	5.8904	6.1960
Máximo	6.0968	6.8496	2.2734	6.3642	6.5464
Desv. Est.	0.7621	0.5408	0.4277	0.5769	0.3486
					0.2826

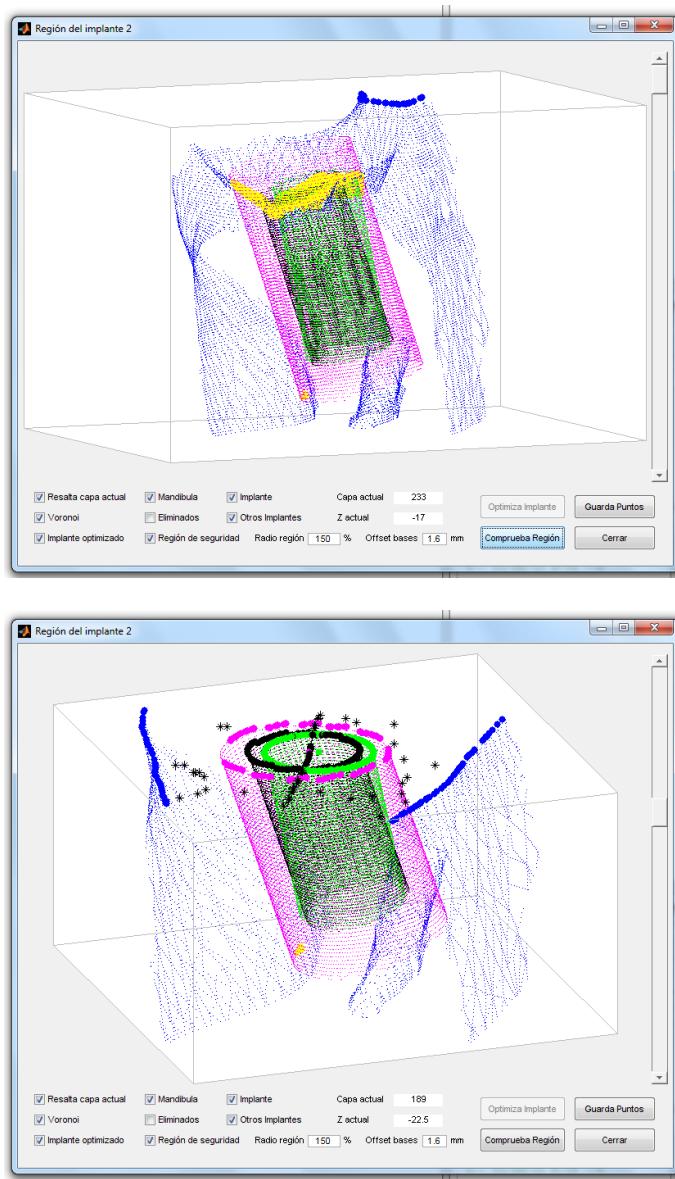


5. Volviendo a la pantalla anterior de “Región del implante 2”:
  - a. Radio región > 150%
  - b. Offset bases > 1,6
6. Los colores se corresponden de la siguiente manera:
  - a. Implante: verde
  - b. Implante optimizado: negro
  - c. Región seguridad: violeta





## 7. Comprueba Región



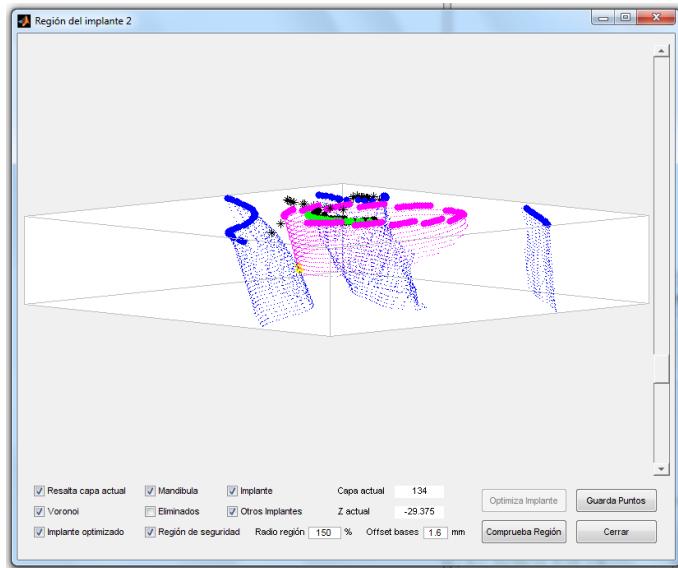
## 8. Conclusiones:

- a. La zona superior no es de estudio, es importante la inferior donde circula el nervio dentario inferior.
- b. Con offset bases 1.6, aparecen unas zonas donde la región de seguridad inferior y la mandíbula coinciden.

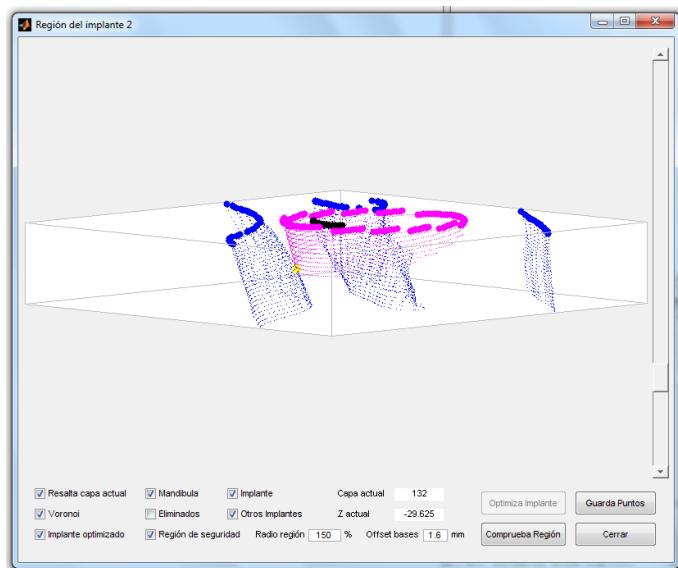


9. Capa 134 con detalle:

- Amarillo: zona donde coinciden la región de seguridad y la mandíbula
- Verde: Implante original (capa más inferior, 134)
- Negro: Implante optimizado (capa más inferior, 132)



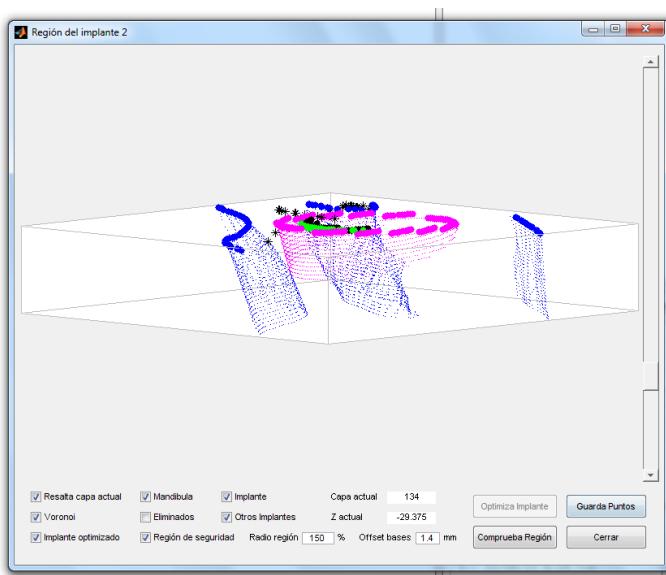
10. Capa 132 con detalle:



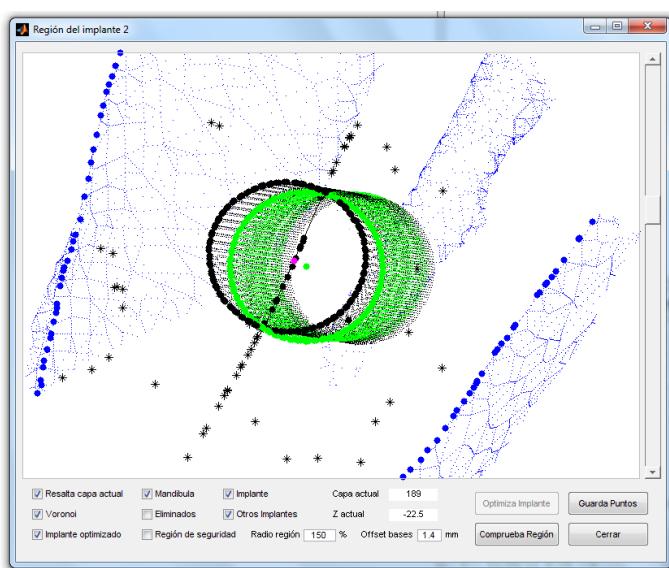


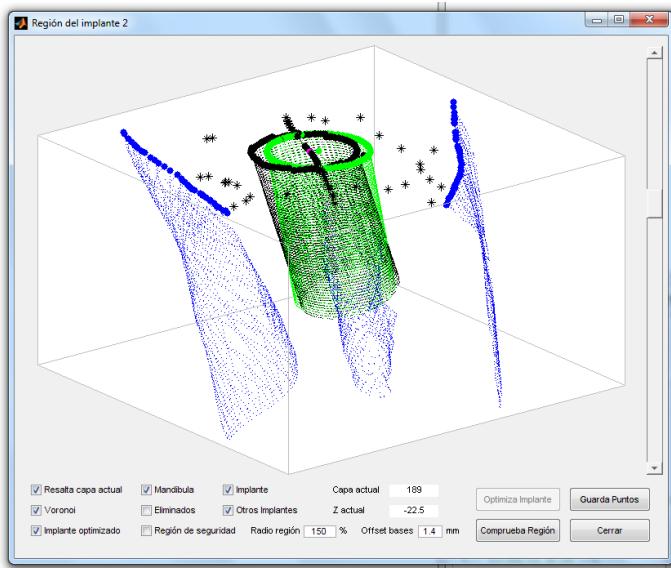
11. Con offset de las bases > 1.4:

- a. No hay interferencias con la “Región de seguridad”



12. Capa 189 con detalle de puntos Voronoi:





13. Guarda puntos:

- Se exportan diferentes ficheros de texto .TXT con puntos: optimización según el diagrama de Voronoi, mandíbula, implante inicial, nervio y puntos eliminados.
- Igualmente, el algoritmo genera un fichero de texto .TXT, con los puntos del implante optimizado. Este archivo de texto será importado en Geomagic Qualify para construir el modelo de la férula.

### 5.2.2. OPTIMIZACIÓN DEL EJE DEL IMPLANTE.

Al igual que en el algoritmo de optimización de acuerdo al diagrama de Voronoi, el objetivo del algoritmo de optimización del eje del implante es obtener un nuevo implante rodeado por un mayor volumen de hueso.

Para ello, en el algoritmo, se define al eje del implante como un vector de 6 componentes  $[x \ y \ z \ i \ j \ k]$  que corresponden:

- $[x \ y \ z]$ : punto base del implante en la capa inferior seleccionada.
- $[i \ j \ k]$ : vector dirección del implante cuyo módulo es igual a la distancia entre capas según la dirección del eje del implante.

Sobre el vector definido, durante la optimización, se mantienen invariables 2 componentes:

- $[z]$ : corresponde a la coordenada  $z$  del punto base del implante en la capa inferior seleccionada. Manteniendo esta coordenada invariable, la optimización se realiza entre las capas seleccionadas y en movimientos horizontales (se modifican las coordenadas  $x, y$  de dicho punto base), y no de forma vertical, al igual que la optimización según el diagrama de Voronoi, por lo que las posteriores comparativas, tendrán elementos en común.
- $[k]$ : corresponde a la componente  $z$  del vector dirección del implante. Manteniendo esta componente invariable, su valor (debido a la forma de definir dicho vector dirección) es siempre igual a la distancia entre 2 capas consecutivas.



Para conseguir una optimización controlada, se limita la posible variación de los parámetros del vector. De esta manera, las componentes x,y del punto base del implante en la capa límite inferior seleccionada, pueden variar su posición hasta un máximo igual al 75% del radio del implante seleccionado. Por otro lado, el vector dirección del implante puede variar hasta un máximo de 4° en cada componente i,j.

Matemáticamente, para cada capa i, el algoritmo calcula la diferencia de las distancias  $d_1$  y  $d_2$  del punto del eje del implante a la pared exterior e interior de la mandíbula, de tal manera que la función objetivo minimiza esa diferencia como se indica:

$$\text{minimizar} \sum_{i=1}^{n^o \text{ capas}} |d_1 - d_2|_i = 0 \rightarrow F_{\text{objetivo}}$$

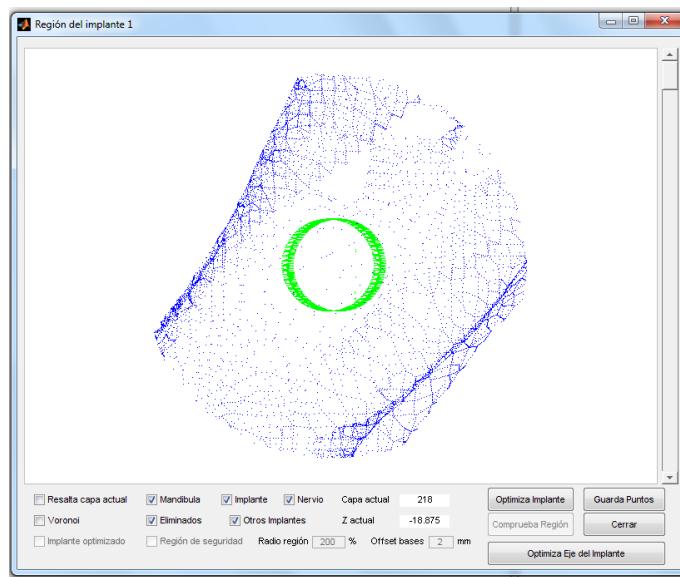
El algoritmo desarrollado trabaja siguiendo el siguiente método:

1. Obtiene como datos de entrada el vector definido [x y z i j k] a partir de la planificación del dentista.
2. Lanza la optimización de acuerdo a la función “lsqnonlin” y dentro de  $F_{\text{objetivo}}$ :
  - a. Calcula puntos de corte de eje con cada capa.
    - i. n capas → n puntos corte.
  - b. Cálculo de la diferencia de distancias  $d_1$  y  $d_2$  para todas las capas.
    - i. En cada capa añadir al vector F un término:
$$F = [F_1 F_2 F_3 \dots]$$
    - ii. Añade a un fichero la suma total de la diferencia de distancias en cada capa para cada optimización.
    - iii. Añade a un fichero los nuevos valores del vector [x y z i j k].
  - c. Realiza sucesivas iteraciones hasta cumplir un criterio de parada establecido.

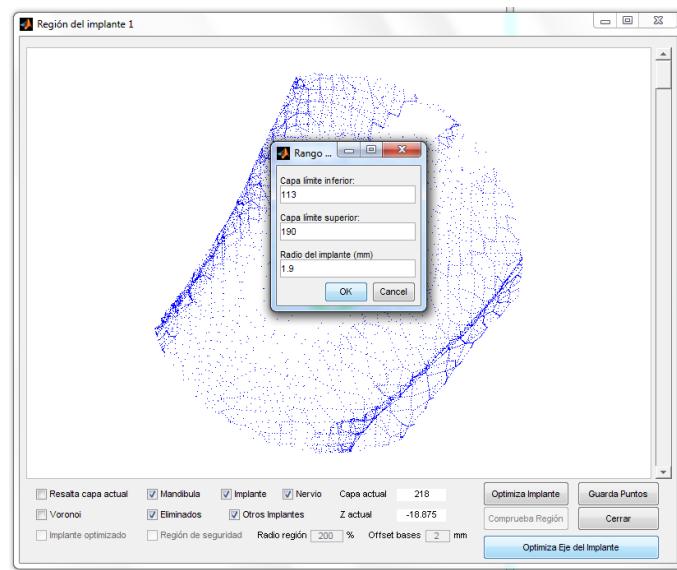


## IMPLANTE 1.

1. Menú > Región Implante > Exporta Implante > 1
- a. Se muestra la siguiente pantalla:



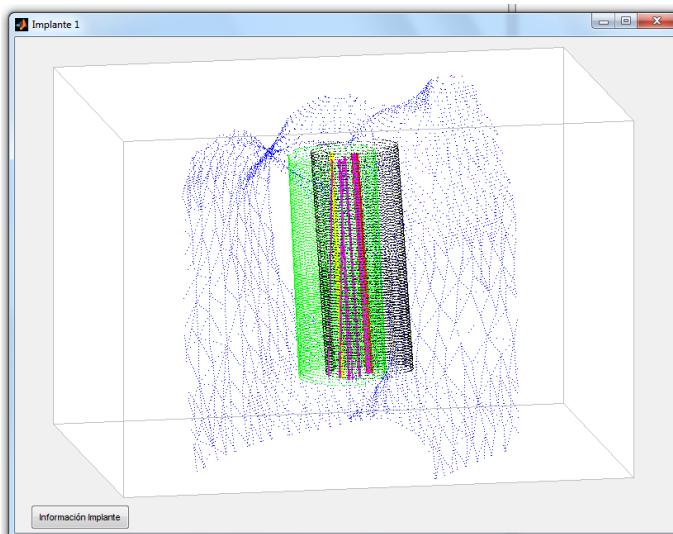
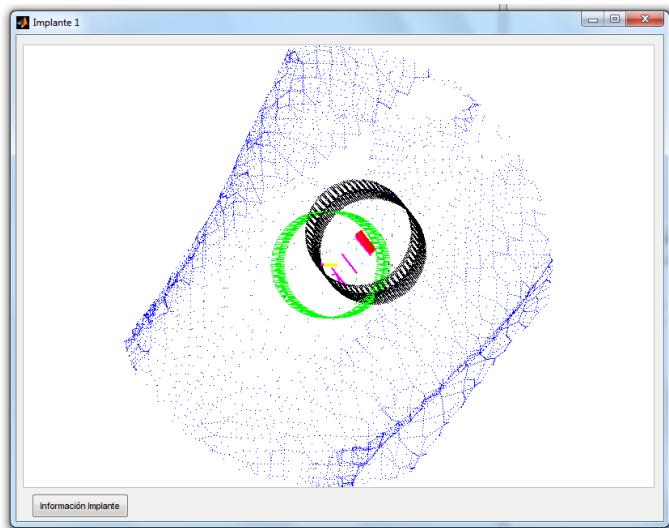
2. Optimiza Eje del Implante:
  - a. Para el implante 1, se seleccionan las capas entre la 113 y la 190, inclusive.
  - b. Para el implante 1, se introduce un valor de radio de 1,9 mm.





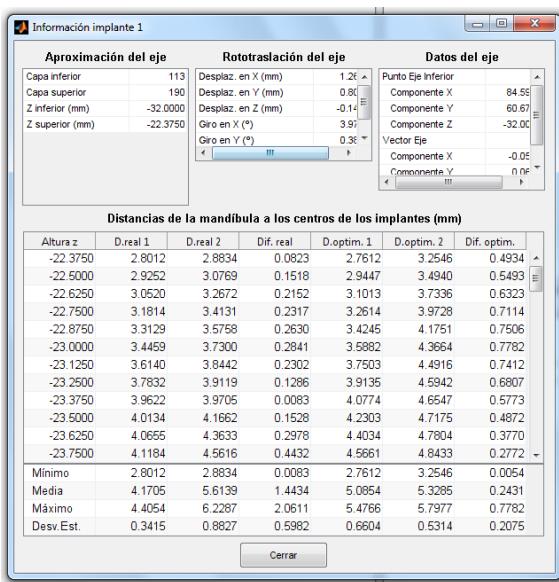
3. Los colores se corresponden de la siguiente manera:

- a. Implante original: verde.
- b. Implante optimizado: negro.
- c. Eje implante original: amarillo.
- d. Eje implante optimizado: rojo.
- e. Ejes implantes iteraciones: rosa.





#### 4. Información Implante:



#### 5. Adicionalmente, el algoritmo genera automáticamente archivos de texto que monitorizan diversos parámetros durante el proceso de cálculo:

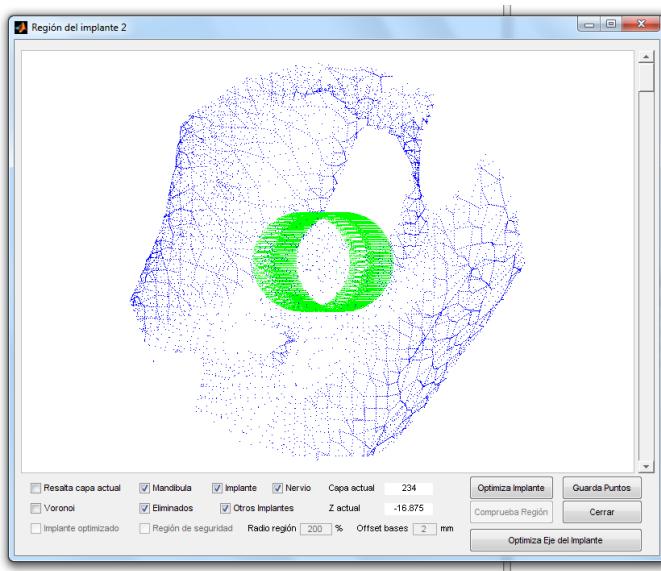
Vector Eje del implante [x y z i j k]						
Implante	x	y	z	i	j	k
Inicial	82,6947	60,2107	-32,0000	0,0018	0,0000	0,1250
Optimizado	84,1947	60,1664	-32,0000	-0,0069	0,0087	0,1250

$n^{\text{o}} \text{ capas}$ $\sum_{i=1}^{n^{\text{o}} \text{ capas}}  d_1 - d_2 _i$	
Implante inicial	Implante optimizado
112,5824	20,9612

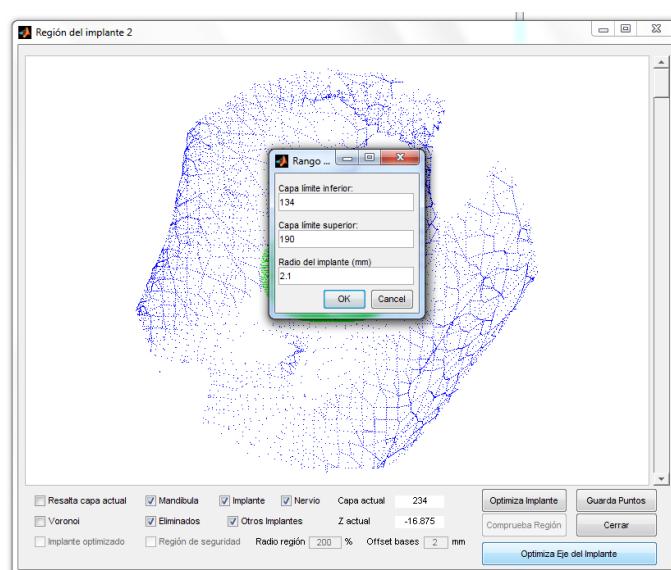


## IMPLANTE 2.

1. Menú > Región Implante > Exporta Implante > 2
  - a. Se muestra la siguiente pantalla:



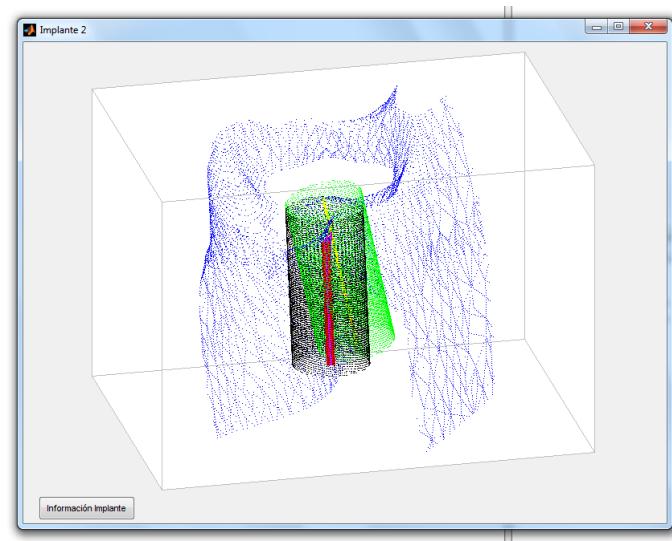
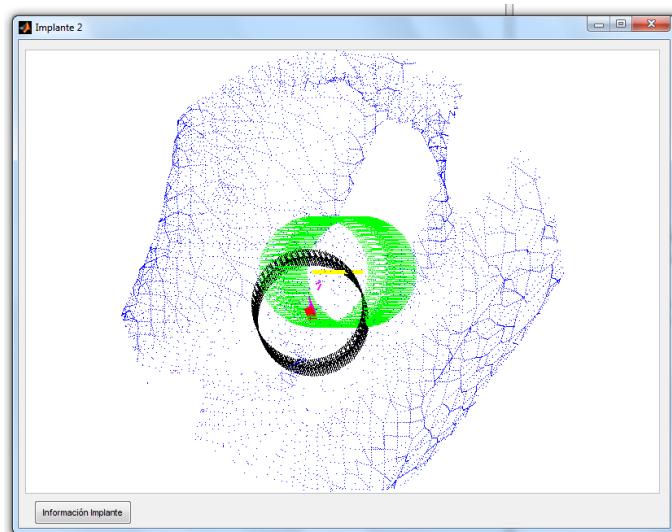
2. Optimiza Eje del Implante:
  - a. Para el implante 2, se seleccionan las capas entre la 134 y la 190, inclusive.
  - b. Para el implante 2, se introduce un valor de radio de 2,1 mm.





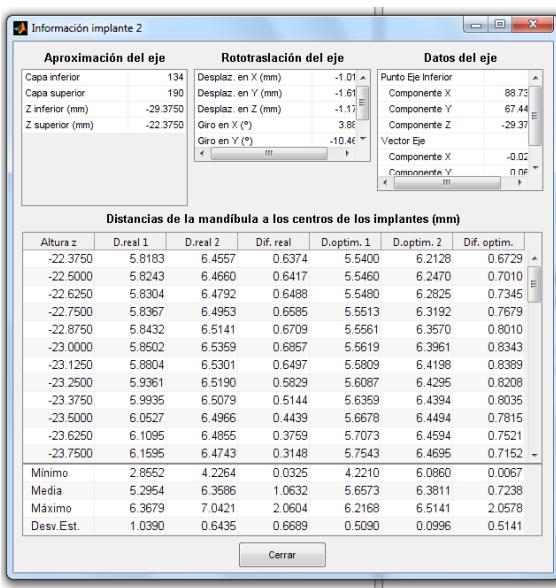
3. Los colores se corresponden de la siguiente manera:

- f. Implante original: verde.
- g. Implante optimizado: negro.
- h. Eje implante original: amarillo.
- i. Eje implante optimizado: rojo.
- j. Ejes implantes iteraciones: rosa.





#### 4. Información Implante:



#### 5. Adicionalmente, el algoritmo genera automáticamente archivos de texto que monitorizan diversos parámetros durante el proceso de cálculo:

Vector Eje del implante [x y z i j k]						
Implante	x	y	z	i	j	k
Inicial	88,8653	69,3053	-29,3750	0,0054	0,0000	0,1250
Optimizado	88,9403	67,8397	-29,3750	-0,0034	0,0087	0,1250

$\sum_{i=1}^{n^o \text{ capas}}  d_1 - d_2 _i$	
Implante inicial	Implante optimizado
60,6013	44,8555



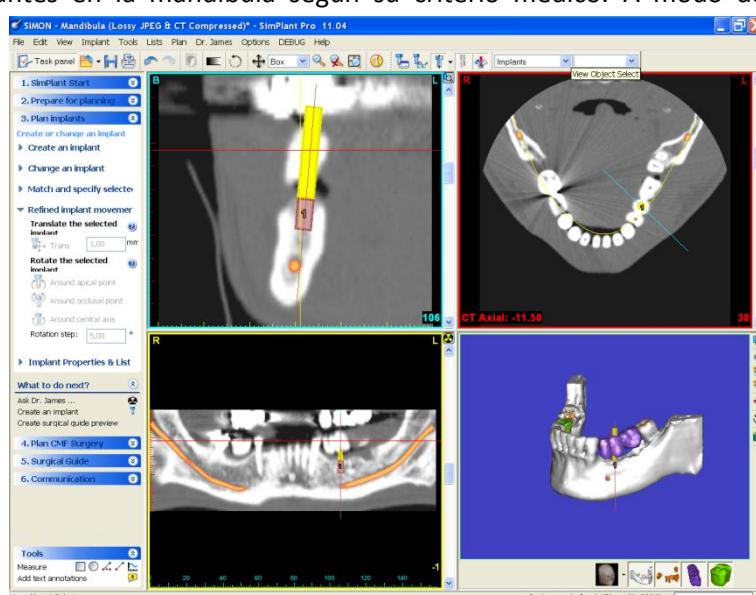
# 6. SECUENCIA DE TRABAJO.

A continuación se detallada la secuencia de trabajo a seguir con la metodología desarrollada en el presente Trabajo Fin de Máster. A modo de resumen general:

1. Obtener archivos .STL de la mandíbula e implantes de la planificación inicial del dentista realizada mediante el software SimPlant o Mimics.
2. Inspeccionar la posición y orientación del modelo de la mandíbula junto con los implantes, en Geomagic Studio. Asimismo, limpiar posibles zonas de “ruido” debidas a la tomografía computarizada (TC).
3. Obtener archivos .SSL de capas de nubes de puntos de la mandíbula e implantes mediante el software Magics.
4. Optimizar la posición de los implantes mediante el algoritmo desarrollado en MATLAB a través de la interfaz de usuario creada. Para ello, será necesario como datos de entrada al algoritmo, cargar los archivos .SSL de nubes de puntos de la mandíbula e implantes, así como el archivo generado en MATLAB que define el nervio maxilar inferior.
5. Diseñar en Geomagic Qualify la férula dentosoportada a partir de los resultados de optimización obtenidos mediante el algoritmo de optimización en MATLAB.
  - a. Se diseñará una férula diferente para cada procedimiento de optimización, junto con la férula correspondiente a la planificación inicial del dentista.
6. Fabricar la férula mediante fabricación aditiva a través de una impresora de prototipado rápido 3D.

## 6.1. OBTENER ARCHIVOS .STL DE LA PLANIFICACIÓN DEL DENTISTA.

Todo el proceso llevado a cabo comienza con la planificación realizada por el dentista a partir de la información proporcionada por una prueba diagnóstica junto con una tomografía computarizada (TC). Con ello, el dentista proporciona un fichero 3D en formato .STL con la posición planificada de los implantes en la mandíbula según su criterio médico. A modo de ejemplo, el software con el que se realizan estas operaciones tiene la siguiente interfaz, con capacidad de navegación en diferentes planos de la mandíbula:

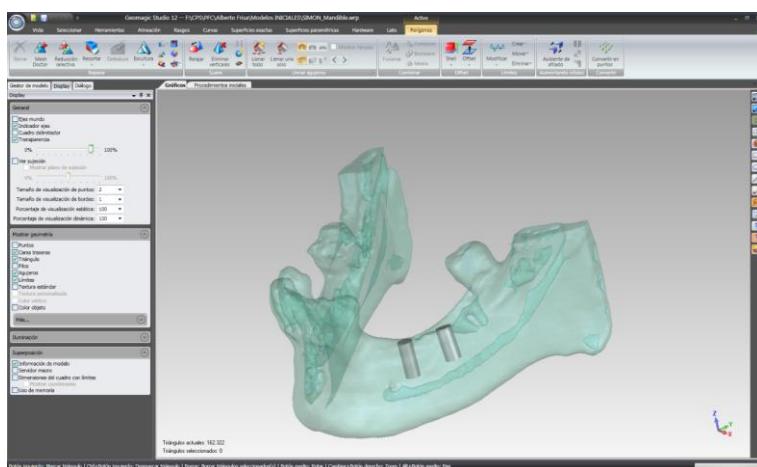




## 6.2. INSPECCIÓN Y CORRECCIÓN DEL MODELO.

Con el modelo 3D en formato de archivo .STL, se inspecciona por primera vez mediante el software Geomagic Studio u otro similar, observando de esta manera, la zona de la mandíbula de interés, la posición de los implantes, o el recorrido del nervio maxilar inferior, que limita la profundidad hasta la que se puede colocar el implante.

Asimismo, aprovechando las herramientas del programa, se puede limpiar ciertas zonas de “ruido”, permitiendo una superficie y volumen totalmente sólido, perfeccionando el archivo para futuras transformaciones.



### 6.2.1. GEOMAGIC STUDIO.

Software de ingeniería inversa. Geomagic Studio transforma datos de escaneado 3D y mallas de polígonos en modelos digitales 3D para ingeniería inversa, diseño de producto, prototipado rápido y análisis.

El software permite crear un modelo de superficie de un objeto a partir de datos escaneados o importados. Tiene la capacidad de combinar nubes de puntos en un único modelo sólido 3D y permite realizar limpieza de conjuntos de datos mal escaneados (“ruido”).

## 6.3. OBTENER ARCHIVOS .SSL DE CAPAS DE NUBES DE PUNTOS EN MAGICS.

Desde el archivo .STL modificado mediante Geomagic Studio, en el que hemos refinado el modelo 3D, eliminando ciertas vacantes que pueden afectar a los resultados posteriores, se extraen del modelo, capas de nubes de puntos en un fichero .SSL.

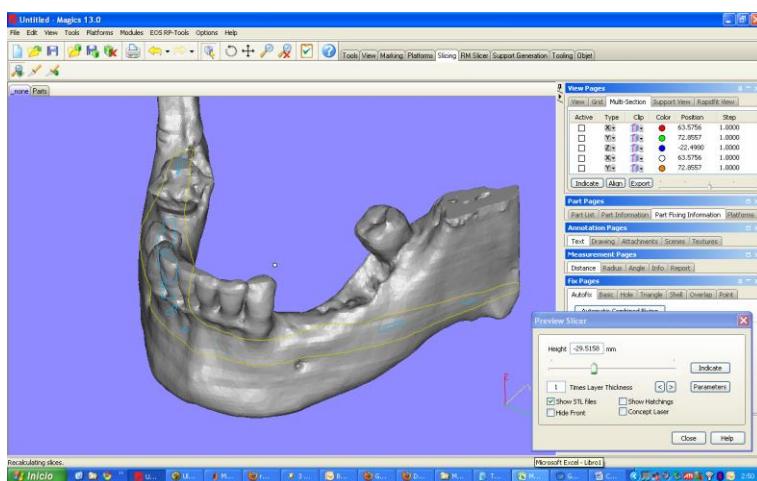
Para ello se emplea el software Magics, en el que se establece un mismo sistema de referencia global tanto para la mandíbula como para los implantes. Asimismo, se establece un valor de distancia entre capas consecutivas de 0,125 mm (valor que se mantendrá en procesos futuros, como por ejemplo, en el tratamiento de las capas en MATLAB).

Se crea un fichero diferente para cada elemento de estudio, en este caso, la mandíbula y cada uno de los implantes. De esta manera cada fichero define por medio de puntos la estructura



de los citados elementos y estos ficheros de nubes de puntos, serán empleados a continuación como datos de entrada en el algoritmo de optimización desarrollado en MATLAB.

Imagen de la interfaz Magics durante el proceso de creación de los archivos de capas de nubes de puntos:



### 6.3.1. MAGICS.

Magics es un software para prototipado rápido para el manejo, edición y corrección de archivos para impresión tridimensional. Este programa permite generar prototipos proporcionando una completa documentación.

Este software puede importar la mayoría de los formatos estándar de modelado tridimensional: .STL, .VDA, .IGES, .STEP; .VRML, .DXF y formatos nativos de programas como: UG/Parasolid y Catia.

Magics incluye capacidades que permiten interactuar directamente con archivos defectuosos corrigiendo errores. Cuenta también con herramientas de corrección automática que son muy sencillas de utilizar.

Se puede utilizar el programa para invertir normales posicionadas incorrectamente, unir bordes mal cerrados entre sí, llenar cavidades, cortar y mezclar superficies e incluso realizar operaciones booleanas.



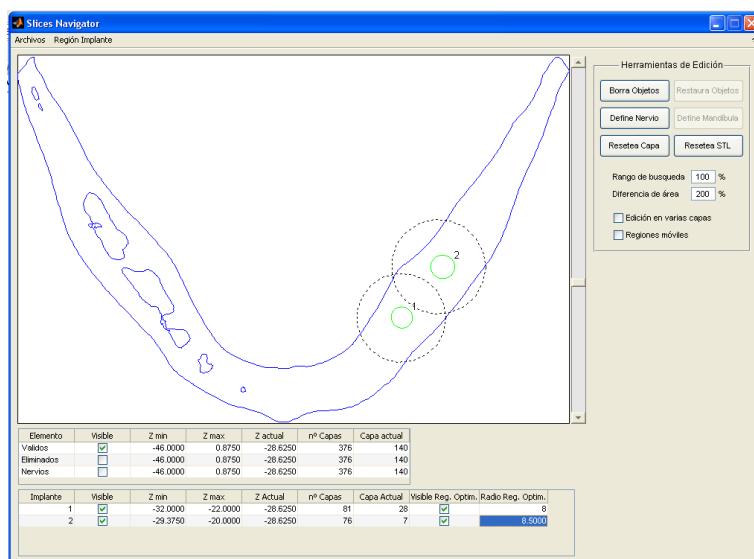
## 6.4. LANZAR PROCEDIMIENTOS DE OPTIMIZACIÓN.

Como ha sido indicado anteriormente, el proceso central de todo el trabajo desarrollado, consistió en la creación de un algoritmo con 2 métodos distintos de optimización mediante la herramienta matemática MATLAB.

Para lanzar dicha optimización, se introduce mediante la interfaz de usuario también creada, los archivos .SSL de capas de nubes de puntos. Una vez introducidos, mediante el navegador de la interfaz, se pueden visualizar todas las capas del modelo, así como eliminar zonas de puntos de “ruido” del modelo de la mandíbula y guardar un nuevo fichero de capas de nubes de puntos corregido (en el caso que sea necesario eliminar esas zonas no eliminadas anteriormente con Geomagic Studio).

Asimismo se puede definir el nervio maxilar inferior a partir de puntos de la mandíbula, y exportarlo a un nuevo archivo .SSL de capas de nubes de puntos para futuros trabajos con el mismo caso de estudio.

Una vez que han sido cargados todos los datos de entrada necesarios en el programa (ficheros de mandíbula, implantes y nervio) para los procedimientos de optimización, se trabaja con la interfaz del programa como se ha descrito en el apartado “Manual de usuario”, obteniendo un resultado diferente según la optimización seleccionada.



En el caso de seleccionar la optimización según el diagrama de Voronoi, el resultado obtenido, son ficheros de texto .TXT que contienen capas de nubes de puntos que definen al nuevo implante optimizado. Por otro lado, al emplear la otra optimización, la del Eje del implante, se obtiene como resultado, un nuevo vector optimizado de 6 componentes [x y z i j k] que define al implante optimizado, como se ha descrito en apartados anteriores.

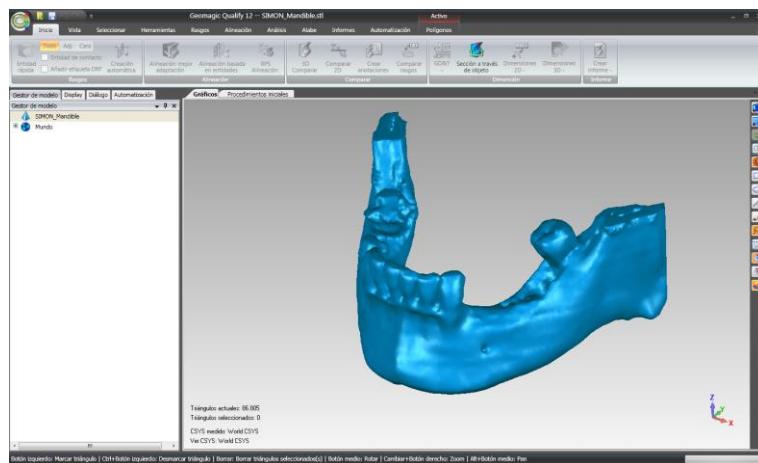


## 6.5. OBTENER LA FÉRULA EN GEOMAGIC QUALIFY A PARTIR DE LA OPTIMIZACIÓN.

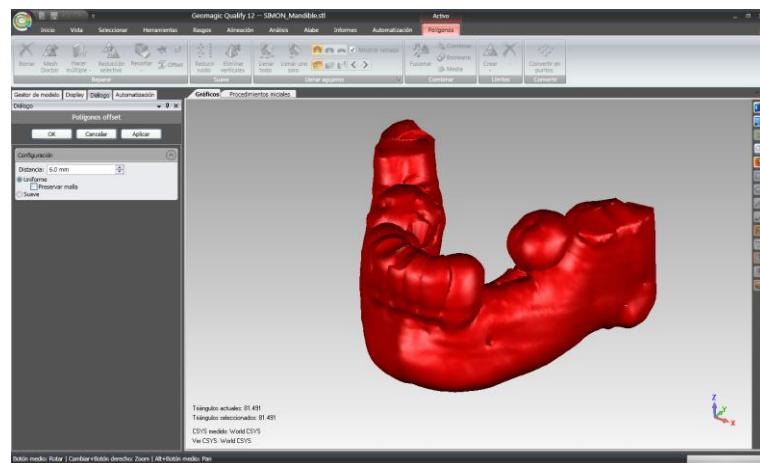
A partir de los resultados obtenidos en MATLAB para cada una de las optimizaciones realizadas para los 2 implantes de la mandíbula del caso estudiado, se ha definido, en cada caso, una nueva posición y orientación del implante, dato que se empleará para el diseño de una férula dentosostenida (debido a las características de la mandíbula estudiada). Es decir, la férula se diseña de acuerdo a la posición y orientación de los implantes optimizados y limitarán la longitud de fresado en la mandíbula en cada posición del implante.

Antes de comenzar con el proceso de diseño, se debe preparar el trabajo a desarrollar, especialmente disponer de los archivos de los implantes de cada optimización. Para ello, se dispone, en el caso de la optimización según el diagrama de Voronoi, directamente de los ficheros de texto .TXT que contienen las capas de nubes de puntos de los nuevos implantes optimizados. Sin embargo, para el caso de la optimización del Eje del Implante, se dispone del ya mencionado vector de 6 componentes que define el nuevo eje del implante optimizado. Desde ese vector, que representa la posición y ubicación del eje del implante en el espacio de trabajo, obtendremos un nuevo cilindro en un archivo que represente al implante de acuerdo a su diámetro y longitud.

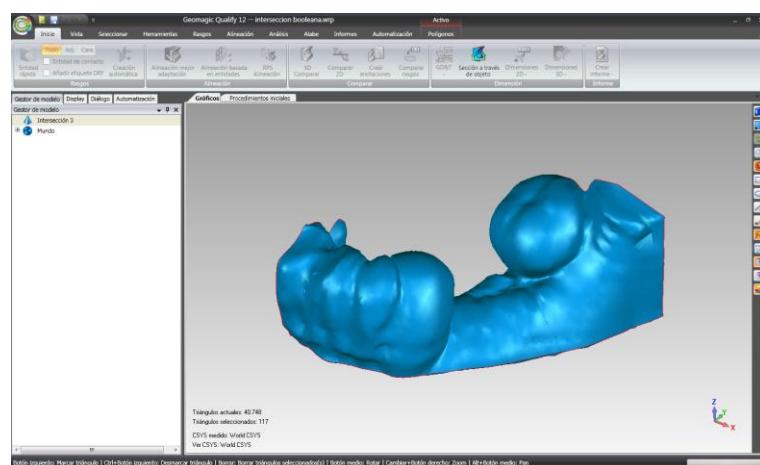
El primer paso en el proceso de diseño mediante el software Geomagic Qualify, es abrir el archivo original de la mandíbula del proyecto de estudio presente durante todo el trabajo.



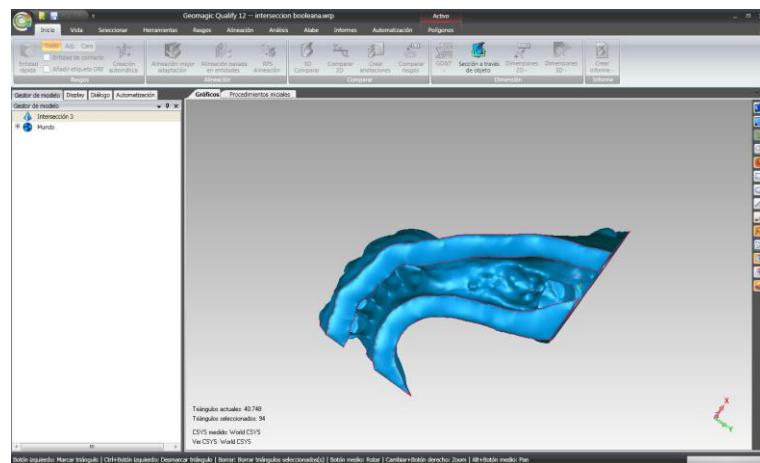
Debido a que el objetivo de la férula a diseñar es ajustarla sobre la mandíbula, se realiza un negativo de la mandíbula sobre un offset de la propia mandíbula de similar geometría. El procedimiento seguido para tal fin, es en primer lugar realizar un offset de 6 mm sobre todo el modelo de la mandíbula, obteniendo un nuevo modelo 3D.



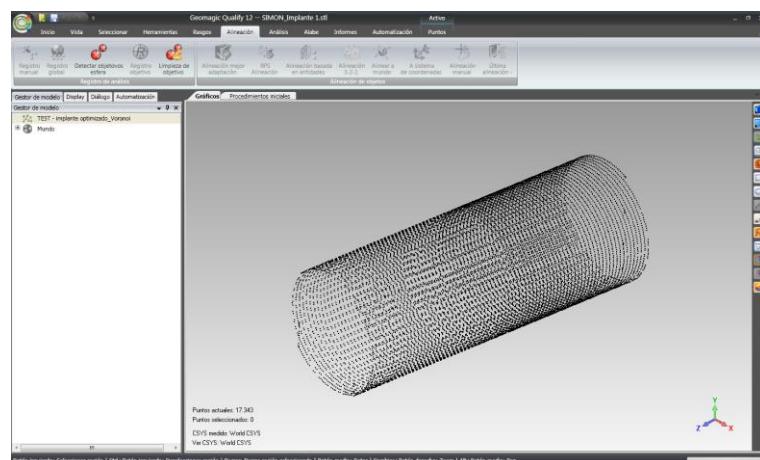
Con el nuevo modelo obtenido sobre el que hemos aplicado dicho desfase de 6 mm y mediante el modelo original de la mandíbula, aplicamos una operación de resta booleana. De esta manera, el modelo desfasado contendrá un hueco de igual volumen a la mandíbula del modelo. A continuación, se realizan diferentes secciones en cada uno de los 3 planos de trabajo, para obtener la férula en sus dimensiones finales.



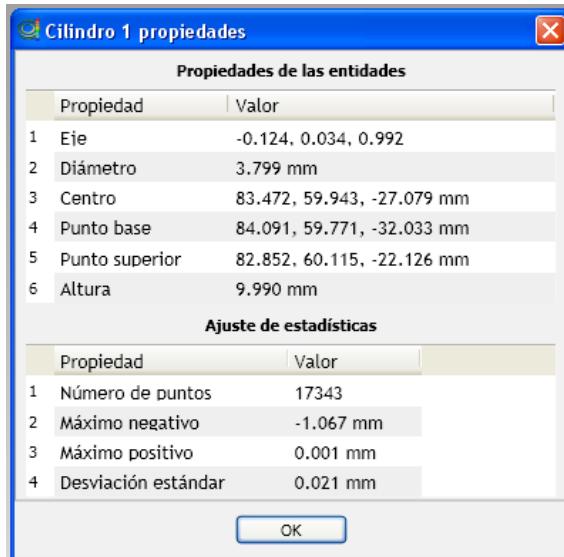
Finalmente, con herramientas del programa, se limpian zonas del modelo de “ruido” para evitar futuros problemas debidos a irregularidades del archivo .STL, obteniendo un modelo 3D para la férula, sobre el que todavía es necesario realizar las perforaciones necesarias para las guías de fresado.



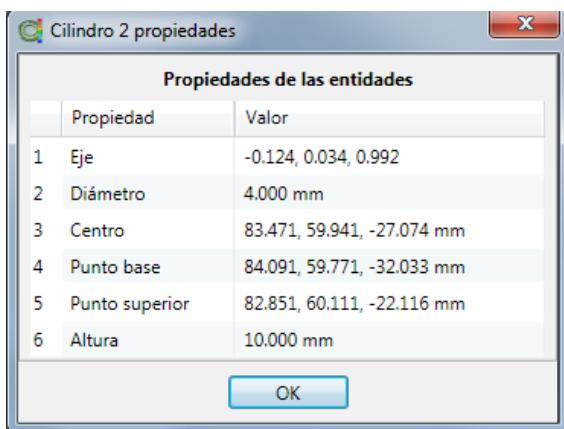
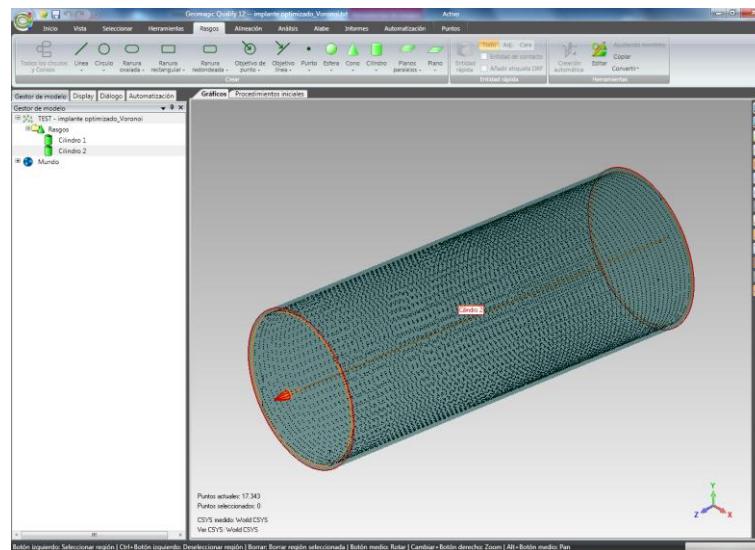
A continuación, se importa al proyecto de Geomagic Qualify, el nuevo implante optimizado mediante el algoritmo en MATLAB. Dicho implante está definido por capas de nubes de puntos en un fichero .TXT generado durante la ejecución del algoritmo de MATLAB. Geomagic Qualify mostrará todos los puntos del implante optimizado contenidos en el archivo.



Mediante el comando Rasgos > Cilindro > Mejor adaptación, se obtiene un cilindro sólido de acuerdo a la nube de puntos importada. Este cilindro, se considera provisional en nuestro diseño y nos permitirá conocer los datos de “Punto base” y “Eje” del implante optimizado inspeccionando sus propiedades.



Conociendo esos datos, se crea un nuevo cilindro definitivo representativo del implante mediante el comando Rasgos > Cilindro > Base y altura, añadiendo las dimensiones del mismo (diámetro y longitud).

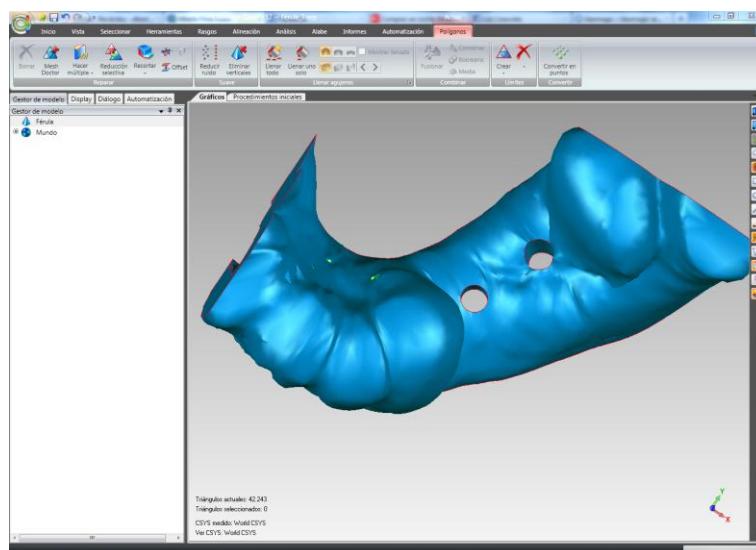




Para continuar con el diseño de la férula a fabricar, necesitamos realizar las perforaciones donde irán las guías de fresado. Para ello se realiza una intersección booleana de un nuevo cilindro utilizando los datos de cada uno de los implantes: “Punto superior”, “Eje”, diámetro y se utiliza una longitud suficiente para realizar dicha intersección de manera completa. El cilindro resultante se debe convertir como objeto poligonal y guardar como fichero independiente de Geomagic Qualify .WRP.

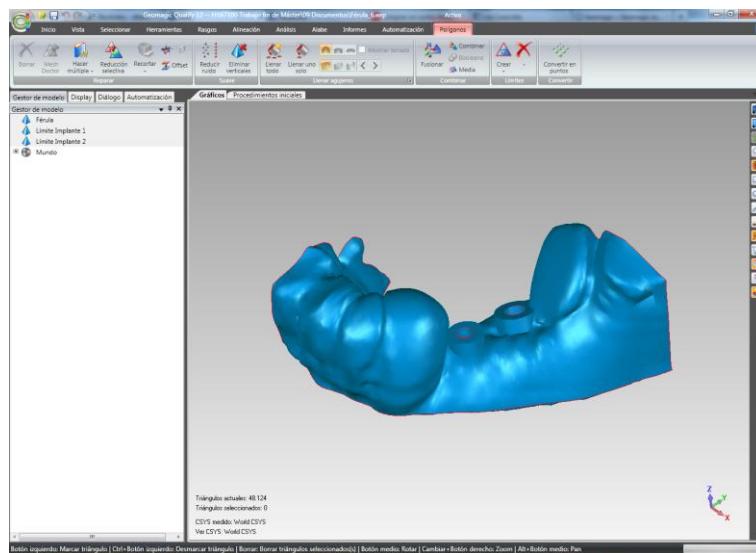
Para el implante 2 del caso de estudio, se realizan las mismas operaciones con el objetivo de obtener otra guía de fresado.

Se abre un nuevo proyecto de Geomagic Qualify donde incorporamos la férula que está siendo diseñada y los cilindros representativos de las guías de fresados para realizar operaciones de intersección booleana y obtener agujeros pasantes en el diseño de la férula. Asimismo, se modifican posibles partes exteriores de la férula en zonas próximas a los agujeros realizados.



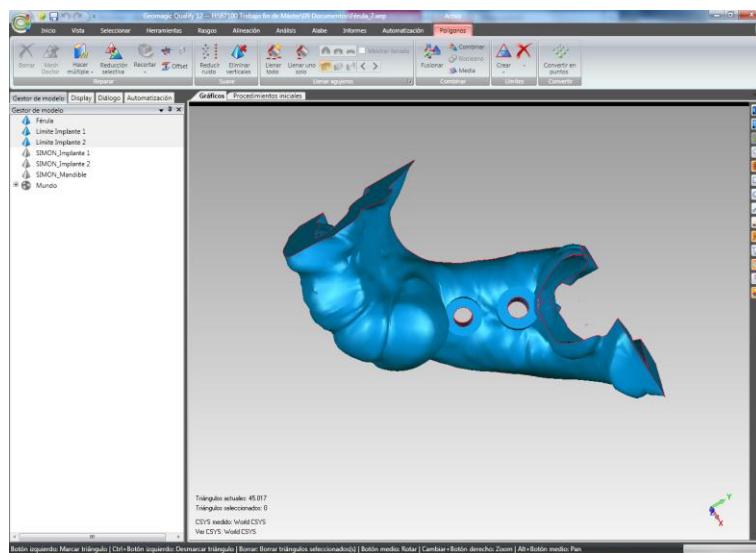
Los agujeros realizados en la férula deben albergar un casquillo de registro para las llaves de registro de las fresas, por lo que se hacen de diámetro mayor al implante, es decir, para los implantes del caso de estudio analizado, de diámetro 4 y 4,4 mm, podría ser necesario realizar agujeros de diámetro 6 mm y colocar unos casquillos de diámetro interior de 5 mm. (criterio médico).

El proceso final del diseño de la férula es insertar en el modelo de la férula unas marcas sobre los agujeros que limiten la profundidad del fresado durante las operaciones quirúrgicas, de acuerdo a las longitudes del implante planificado en la optimización. Para ello se realiza en el programa, operaciones de unión de material con cilindros huecos que permitan el paso de la fresa utilizada pero limiten la profundidad de trabajo de la herramienta.



Se debe comprobar que no existen interferencias de montaje entre la férula diseñada y la mandíbula, y en caso necesario se rediseña la geometría de la férula sin afectar a zonas importantes de la misma como aquella donde se encuentran las guías de fresado.

Finalmente se realiza sobre la férula los canales de irrigación de cada guía de fresado, es decir, unos pequeños agujeros pasantes por delante de cada zona de las guías empleados como conductos para irrigar el tejido del paciente durante la intervención quirúrgica en el momento del fresado sobre la mandíbula. La irrigación permite que la temperatura en esa zona, especialmente, partes óseas, sea muy elevada y puedan aparecer complicaciones y problemas médicos debido a la generación de calor.

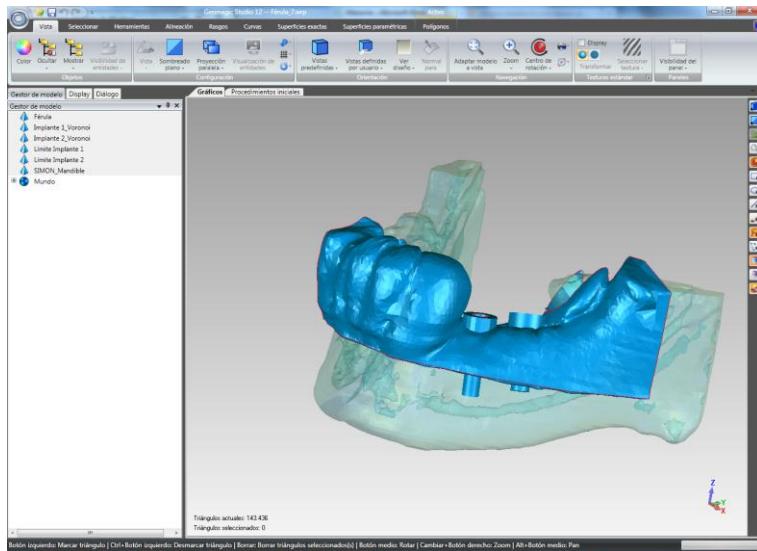


A modo de resumen esquemático, se ilustra en la siguiente figura tomada realizando una inspección con el software Geomagic Studio:

- Mandíbula (encía).
- Nervio maxilar inferior (para entender la limitación de altura).
- Férula con cilindro limitador de altura (con agujero pasante).



- Guiado de la fresa.
- Implante 1 e implante 2 optimizados del caso de estudio según el método del diagrama de Voronoi.
- Distancia de seguridad del nervio.



De manera alternativa, el programa utilizado en el ámbito médico “SimPlant” de Materialise, tiene la capacidad de generar férulas dentales en función del modelo de la mandíbula y los implantes a incorporar. Este método también ha sido evaluado en el presente Trabajo Fin de Máster.

### 6.5.1. GEOMAGIC QUALIFY.

Software de metrología, que ayuda en el proceso de control de calidad de los productos fabricados en la producción moderna más rápida y más detallada. Dispone de muchas herramientas de nubes de puntos y modelos CAD para combinar y comparar gráficamente la forma entre modelos.

Es un software desarrollado por la empresa Geomagic, Inc. ubicada en Carolina del Norte, Estados Unidos. El software que brinda Geomagic es fácil de utilizar, rápido y muy preciso ideal para realizar inspección de componentes y análisis de diseño, propiedades y materiales. Entre las características más representativas de este software se encuentran:

- Integración directa con la mayoría de los escáneres 3D y software de CAD/CAM.
- Capacidad de procesamiento de formas complejas.
- Tiempo reducido de entrenamiento.

### 6.6. FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE PROTOTIPO RÁPIDO.

Los procesos aditivos son aquellos que permiten fabricar un objeto desde cero (sin comenzar con un bloc de material base), donde las máquinas van añadiendo material.

Los procesos aditivos incluyen, entre otros, todas las tecnologías de Prototipado Rápido (RP) con métodos como la impresión 3D, la Estereolitografía (SLA) o el Sinterizado Selectivo Láser



(SLS). Todos los procesos aditivos tienen en común el hecho que pueden generar geometrías muy complejas de una forma muy rápida. En todos los casos, los objetos presentan una textura material de capas muy finas, casi imperceptibles.

En el caso desarrollado para el presente Trabajo Fin de Máster, la fabricación de la férula dentosoportada se realiza mediante impresora 3D de prototipado rápido a partir del modelo diseñado mediante el software Geomagic Qualify. Una vez fabricada la férula, se insertan casquillos de acero, que serán las guías de fresado en la férula, en las zonas de los implantes.

Finalmente, para la validación del presente trabajo, se fabrica mediante prototipado rápido a partir del CAD, un biomodelo de la mandíbula del paciente para el que se ha elaborado la férula optimizada, sobre la que se evaluará el montaje de la férula.





## 7. LÍNEAS FUTURAS.

El ámbito de aplicación del Trabajo Fin de Máster presentado, se ubica en un terreno de gran evolución, debido en parte a ser un trabajo perteneciente tanto a la disciplina de la Ingeniería Biomédica como a las técnicas de fabricación aditiva como el prototipado rápido.

Sobre el trabajo realizado, se plantean varios puntos en los que continuar realizando trabajos de investigación, de acuerdo a los procedimientos abordados.

Por un lado, realizar una nueva versión del programa creado, que en un primer término debería enfocarse en automatizar en mayor medida el proceso de cálculo de la optimización, evitando al usuario implicarse en exceso en la entrada y la recogida de datos. Además sería interesante centrar en mayor medida el algoritmo en estudiar y evaluar regiones de seguridad donde interfieran el posible implante optimizado con el nervio maxilar inferior.

Asimismo, otra alternativa es crear nuevos algoritmos de optimización bajo otros criterios de los ya trabajados, haciendo especial referencia, como se ha comentado, en la posición del nervio maxilar inferior respecto a la posición del implante.

Por otro lado, mejorar o modificar el procedimiento de diseño de la férula. Como se ha indicado, la férula se diseña en Geomagic Qualify incorporando las guías de fresado según la posición y orientación optimizadas para cada implante. Es posible, obtener férulas de manera automática con otros software de ámbito médico como Materialise SimPlant, donde de acuerdo al modelo de la mandíbula del paciente y a los implantes empleados, se genera la férula necesaria automáticamente, lo que permite agilizar este proceso de fabricación de la férula.

Finalmente, teniendo en cuenta la aplicación médica del trabajo realizado, una opción interesante es prestar atención a los nuevos materiales que para tal fin aparezcan para fabricación aditiva mediante prototipado rápido.



## 8. CONCLUSIONES.

---

En el presente Trabajo Fin de Máster se han realizado diversas labores que aportan novedades en el campo de aplicación tratado. Como todo trabajo de investigación, la evolución del mismo ha ido variando en función de los resultados obtenidos en etapas intermedias y al abordar un ámbito completamente novedoso. El trabajo queda incluido bajo la disciplina tanto de la ingeniería biomédica como de la ingeniería de diseño y fabricación.

Tal y como se ha explicado, el proceso actual del diseño y fabricación de férulas para cirugía guiada, comienza con un diagnóstico inicial de un médico especialista, que en base generalmente de imágenes 3D procedentes de pruebas diagnósticas como la tomografía computarizada (TC), realiza una planificación de la posición y orientación de cada uno de los implantes necesarios sobre la mandíbula del paciente tratado. Mediante esa planificación de la ubicación de los implantes y en función de la mandíbula del paciente, laboratorios o centros especializados, fabrican la férula indicando a su vez la secuencia de trabajo a realizar por el dentista, así como otras características (dimensiones de los implantes y características de fresas a utilizar).

Una vez conocido el proceso actual, el trabajo realizado tiene como objetivo optimizar de manera matemática la posición y orientación de los implantes necesarios en cada caso de estudio. De esta manera, se ha desarrollado completamente un software mediante MATLAB, que calcula dos optimizaciones diferentes para la planificación inicial del dentista, siendo el criterio objetivo, obtener el mayor volumen de hueso disponible alrededor del implante, comparando posteriormente los resultados de ambos métodos de optimización con los resultados de la planificación inicial.

Posteriormente, con los nuevos implantes calculados mediante el algoritmo creado, se diseña mediante software 3D de ingeniería inversa e inspección, una férula dentosostenida para un caso médico real en función de la mandíbula del paciente (para conseguir una adaptación total entre férula y mandíbula) y la posición y orientación de los nuevos implantes optimizados.

Para finalizar y validar todo el trabajo que ha sido llevado a cabo, se ha analizado la viabilidad de las tecnologías de prototipado rápido para este proyecto. Una vez diseñada la férula, como se ha indicado, se obtiene un fichero de pieza 3D en formato .STL desde el cual podemos realizar la fabricación del modelo mediante prototipado rápido en una impresora 3D. Asimismo, se imprime por el mismo método, el modelo de la mandíbula del mismo caso de estudio para evaluar el montaje entre férula y mandíbula.

En conclusión, se ha realizado un trabajo con varias etapas diferenciadas:

1. Programación de un algoritmo para generar un programa propio para lanzar procedimientos de optimización.
2. Diseño de una férula dentosostenida en función de datos iniciales y obtenidos mediante el programa desarrollado.
3. Fabricación aditiva por prototipado rápido del modelo diseñado y optimizado de la férula.



# ANEJOS A LA MEMORIA.

## I. COMPARATIVA DE OPTIMIZACIONES.

En este primer punto del anexo, se adjunta la tabla de resultados de las distancias en cada capa, del punto del eje del implante al punto más próximo de la pared exterior e interior de la mandíbula, obtenidas tras realizar todas las optimizaciones. Asimismo se indica la diferencia por capa entre ambas distancias y se mencionan los valores de la optimización con los de la planificación inicial del dentista.

Los cálculos para estas distancias los realiza de manera interna el programa realizado y los muestra al usuario a través de su interfaz:

Cota Z	Planificación inicial			Optimización Diagrama de Voronoi			Optimización Eje del implante		
	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2
-22,3750	2,8012	2,8834	0,0823	2,6909	2,9910	0,3001	2,6206	3,1717	0,5510
-22,5000	2,9199	3,0827	0,1629	2,7981	3,2014	0,4033	2,8051	3,4050	0,5999
-22,6250	3,0414	3,2790	0,2377	2,9089	3,4078	0,4989	2,9444	3,6614	0,7170
-22,7500	3,1649	3,4328	0,2680	3,0231	3,5680	0,5449	3,0865	3,8427	0,7562
-22,8750	3,2921	3,6030	0,3109	3,1400	3,7450	0,6050	3,2311	4,0240	0,7928
-23,0000	3,4204	3,7649	0,3446	3,2589	3,9143	0,6554	3,3651	4,2054	0,8403
-23,1250	3,5825	3,8869	0,3044	3,4122	4,0447	0,6326	3,5088	4,3623	0,8535
-23,2500	3,7452	3,9593	0,2140	3,5650	4,1321	0,5671	3,6788	4,4345	0,7556
-23,3750	3,9282	4,0169	0,0886	3,7385	4,1992	0,4607	3,8530	4,5045	0,6515
-23,5000	4,0755	4,1190	0,0435	3,9197	4,2672	0,3476	4,0293	4,5755	0,5463
-23,6250	4,1351	4,3116	0,1765	4,1026	4,3362	0,2336	4,2057	4,6455	0,4398
-23,7500	4,1955	4,5057	0,3102	4,2870	4,4061	0,1191	4,3824	4,7082	0,3258
-23,8750	4,2457	4,6771	0,4314	4,4497	4,4663	0,0166	4,5521	4,7710	0,2189
-24,0000	4,2750	4,8394	0,5644	4,5063	4,6024	0,0961	4,7099	4,8338	0,1239
-24,1250	4,3044	4,9948	0,6904	4,5464	4,7477	0,2013	4,8561	4,8746	0,0185
-24,2500	4,3340	5,1038	0,7698	4,5867	4,8488	0,2621	4,9016	4,9556	0,0540
-24,3750	4,3641	5,2212	0,8571	4,6274	4,9555	0,3281	4,9291	5,0530	0,1239
-24,5000	4,3944	5,3365	0,9421	4,6683	5,0598	0,3915	4,9571	5,1462	0,1891
-24,6250	4,4248	5,4387	1,0139	4,7093	5,1525	0,4432	4,9853	5,2391	0,2537
-24,7500	4,4556	5,5372	1,0816	4,7495	5,2456	0,4961	5,0141	5,3344	0,3203
-24,8750	4,4861	5,6397	1,1537	4,7911	5,3366	0,5455	5,0433	5,4322	0,3888
-25,0000	4,5178	5,7364	1,2186	4,8338	5,4241	0,5903	5,0725	5,4998	0,4272
-25,1250	4,5229	5,8009	1,2780	4,8486	5,4819	0,6333	5,0835	5,5599	0,4764
-25,2500	4,5288	5,8237	1,2949	4,8642	5,4976	0,6334	5,1032	5,5931	0,4899
-25,3750	4,5359	5,8480	1,3121	4,8808	5,5114	0,6306	5,1214	5,6083	0,4870
-25,5000	4,5441	5,8737	1,3296	4,8985	5,5264	0,6279	5,1379	5,6236	0,4858
-25,6250	4,5534	5,9006	1,3473	4,9172	5,5427	0,6255	5,1545	5,6390	0,4845
-25,7500	4,5638	5,9290	1,3652	4,9371	5,5604	0,6233	5,1713	5,6560	0,4847



<b>-25,8750</b>	4,5754	5,9586	1,3832	4,9580	5,5793	0,6212	5,1882	5,6709	0,4827
<b>-26,0000</b>	4,5882	5,9897	1,4015	4,9800	5,5997	0,6197	5,2053	5,6860	0,4807
<b>-26,1250</b>	4,6020	5,9976	1,3956	5,0030	5,5969	0,5939	5,2198	5,6890	0,4692
<b>-26,2500</b>	4,6171	5,9992	1,3821	5,0270	5,5878	0,5609	5,2264	5,6803	0,4538
<b>-26,3750</b>	4,6278	6,0020	1,3742	5,0521	5,5799	0,5279	5,2360	5,6719	0,4360
<b>-26,5000</b>	4,6427	6,0055	1,3628	5,0731	5,5729	0,4998	5,2437	5,6638	0,4202
<b>-26,6250</b>	4,6535	6,0106	1,3572	5,0953	5,5671	0,4718	5,2515	5,6561	0,4046
<b>-26,7500</b>	4,6408	6,0168	1,3759	5,0939	5,5624	0,4685	5,2593	5,6518	0,3925
<b>-26,8750</b>	4,6367	6,0242	1,3875	5,1036	5,5587	0,4551	5,2673	5,6431	0,3758
<b>-27,0000</b>	4,6450	6,0317	1,3867	5,1223	5,5558	0,4335	5,2752	5,6343	0,3591
<b>-27,1250</b>	4,6478	6,0243	1,3766	5,1331	5,5408	0,4077	5,2802	5,6204	0,3402
<b>-27,2500</b>	4,6487	5,9968	1,3481	5,1454	5,5032	0,3577	5,2849	5,5940	0,3091
<b>-27,3750</b>	4,6512	5,9714	1,3202	5,1592	5,4708	0,3116	5,2949	5,5670	0,2721
<b>-27,5000</b>	4,6556	5,9507	1,2951	5,1745	5,4437	0,2692	5,3039	5,5403	0,2363
<b>-27,6250</b>	4,6614	5,9347	1,2734	5,1913	5,4220	0,2307	5,3112	5,5134	0,2022
<b>-27,7500</b>	4,6690	5,9234	1,2545	5,2096	5,3969	0,1872	5,3186	5,4865	0,1679
<b>-27,8750</b>	4,6782	5,9134	1,2353	5,2294	5,3674	0,1380	5,3261	5,4598	0,1337
<b>-28,0000</b>	4,6890	5,8937	1,2047	5,2505	5,3377	0,0872	5,3337	5,4328	0,0991
<b>-28,1250</b>	4,6892	5,8790	1,1898	5,2610	5,3131	0,0521	5,3368	5,4113	0,0746
<b>-28,2500</b>	4,6834	5,8694	1,1861	5,2653	5,2938	0,0284	5,3374	5,3961	0,0587
<b>-28,3750</b>	4,6776	5,8552	1,1775	5,2698	5,2746	0,0048	5,3381	5,3810	0,0429
<b>-28,5000</b>	4,6720	5,8369	1,1649	5,2555	5,2744	0,0190	5,3390	5,3659	0,0269
<b>-28,6250</b>	4,6664	5,8231	1,1567	5,2320	5,2791	0,0470	5,3397	5,3508	0,0110
<b>-28,7500</b>	4,6608	5,8134	1,1526	5,2084	5,2836	0,0753	5,3356	5,3404	0,0048
<b>-28,8750</b>	4,6553	5,8080	1,1527	5,1893	5,2884	0,0991	5,3205	5,3318	0,0113
<b>-29,0000</b>	4,6517	5,8070	1,1553	5,1748	5,2950	0,1202	5,3055	5,3403	0,0348
<b>-29,1250</b>	4,6479	5,8020	1,1542	5,1592	5,3014	0,1422	5,2941	5,3333	0,0392
<b>-29,2500</b>	4,6461	5,7904	1,1443	5,1399	5,3099	0,1700	5,2876	5,3458	0,0583
<b>-29,3750</b>	4,6445	5,7801	1,1356	5,1223	5,3186	0,1963	5,2619	5,3309	0,0690
<b>-29,5000</b>	4,6430	5,7714	1,1284	5,1065	5,3273	0,2208	5,2484	5,3315	0,0831
<b>-29,6250</b>	4,6414	5,7642	1,1229	5,0927	5,3359	0,2432	5,2356	5,3333	0,0977
<b>-29,7500</b>	4,6399	5,7808	1,1409	5,1208	5,3446	0,2238	5,3362	5,3586	0,0223
<b>-29,8750</b>	4,6382	5,7680	1,1298	5,0952	5,3532	0,2580	5,3268	5,3402	0,0135
<b>-30,0000</b>	4,6367	5,7517	1,1149	5,0621	5,3618	0,2997	5,2001	5,3454	0,1454
<b>-30,1250</b>	4,6352	5,7547	1,1195	5,0585	5,3705	0,3120	5,1959	5,3517	0,1559
<b>-30,2500</b>	4,6337	5,7637	1,1300	5,0486	5,3792	0,3306	5,1976	5,3590	0,1615
<b>-30,3750</b>	4,6351	5,7729	1,1378	5,0366	5,3905	0,3539	5,2045	5,3621	0,1576
<b>-30,5000</b>	4,6293	5,7744	1,1451	5,0305	5,3954	0,3648	5,2165	5,3610	0,1444
<b>-30,6250</b>	4,6269	5,7777	1,1507	5,0304	5,4032	0,3728	5,2337	5,3634	0,1298
<b>-30,7500</b>	4,6245	5,7859	1,1614	5,0362	5,4110	0,3748	5,2559	5,3696	0,1137
<b>-30,8750</b>	4,6221	5,7990	1,1769	5,0479	5,4189	0,3710	5,2830	5,3758	0,0928
<b>-31,0000</b>	4,6197	5,8171	1,1974	5,0655	5,4267	0,3612	5,3151	5,3785	0,0634
<b>-31,1250</b>	4,6173	5,8425	1,2252	5,0823	5,4346	0,3522	5,3296	5,3813	0,0517
<b>-31,2500</b>	4,6146	5,8726	1,2580	5,0972	5,4424	0,3452	5,3424	5,3840	0,0416

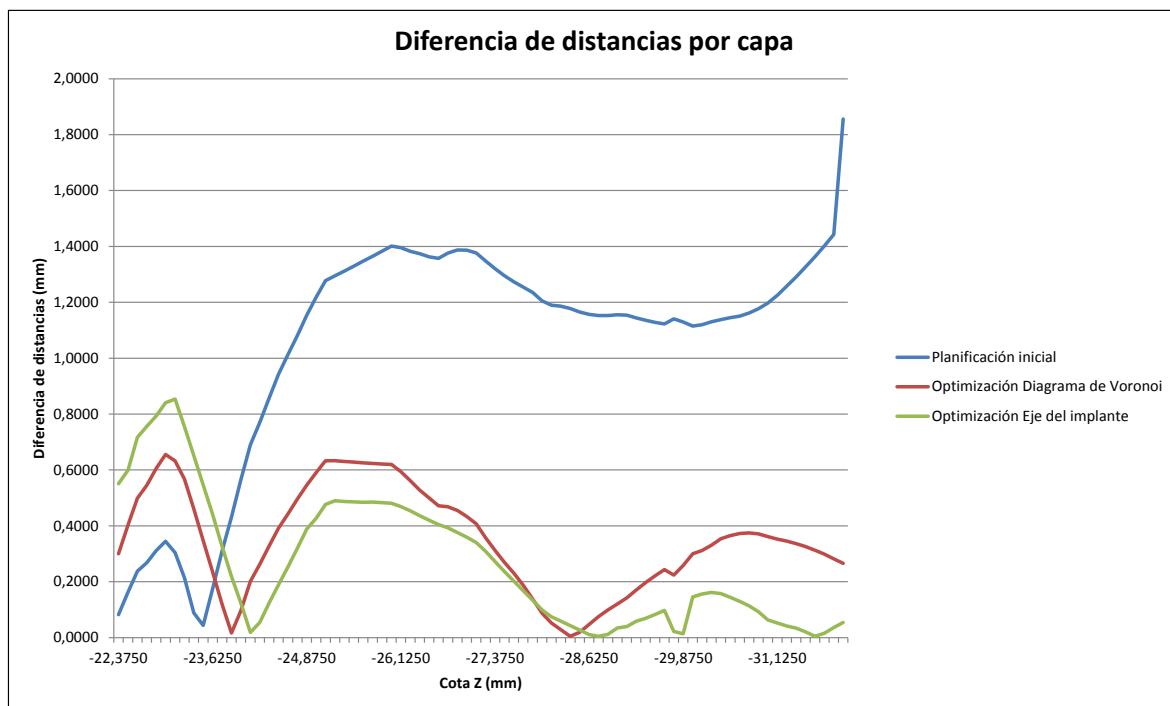


-31,3750	4,6125	5,9035	1,2910	5,1140	5,4503	0,3363	5,3532	5,3868	0,0336
-31,5000	4,6102	5,9366	1,3264	5,1327	5,4582	0,3255	5,3662	5,3865	0,0203
-31,6250	4,6078	5,9715	1,3637	5,1533	5,4661	0,3128	5,3814	5,3860	0,0045
-31,7500	4,6059	6,0076	1,4017	5,1757	5,4740	0,2983	5,3832	5,3988	0,0156
-31,8750	4,6032	6,0462	1,4430	5,2000	5,4820	0,2820	5,3805	5,4162	0,0357
-32,0000	4,0947	5,9506	1,8559	5,2261	5,4916	0,2654	5,3782	5,4324	0,0542

Además, para simplificar el resultado de las optimizaciones, se calculan los valores mínimos y máximos de las distancias, así como la media y la desviación estándar para cada procedimiento de optimización y la planificación inicial del dentista.

	Planificación inicial			Optimización Diagrama de Voronoi			Optimización Eje del implante		
	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2	D1 (mm)	D2 (mm)	D1-D2
Mínimo	2,8012	2,8834	0,0435	2,6909	2,991	0,0048	2,6206	3,1717	0,0045
Media	4,4201	5,4727	1,0525	4,7814	5,1316	0,3502	4,9486	5,2173	0,2687
Máximo	4,6892	6,0462	1,8559	5,2698	5,5997	0,6554	5,3832	5,6890	0,8535
Desviación	0,4405	0,8088	0,4104	0,6491	0,6120	0,1847	0,6836	0,5377	0,2361

Gráficamente, se observa que el criterio estudiado de conseguir un mayor volumen de hueso alrededor del implante con los procedimientos de optimización desarrollados, se cumple al reducir la diferencia entre las distancias del centro del implante a la pared exterior e interior de la mandíbula por cada capa:





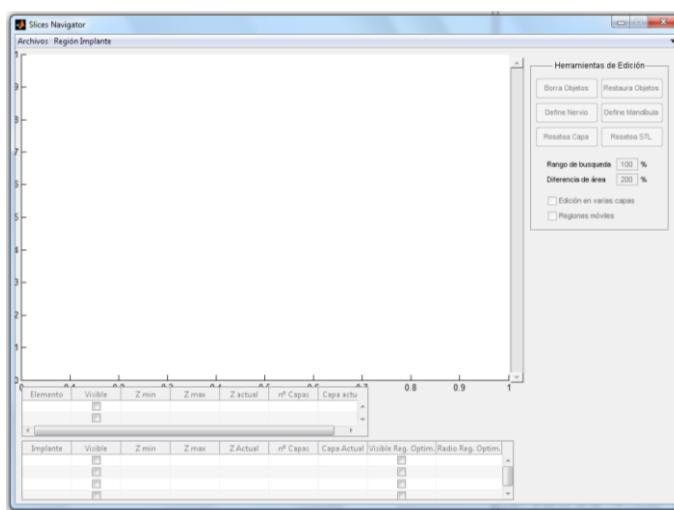
## II. ALGORITMO DEL PROGRAMA.

Con la finalidad de reflejar los recursos destinados a la creación de un nuevo programa mediante MATLAB, donde han sido programadas las funciones de optimización bajo una interfaz de control para el usuario, se desarrollan a continuación las partes más representativas del código de todo el algoritmo (sin hacerlo público), que comprende la generación de la interfaz de usuario y todos los comandos de ejecución de cálculos, así como el tratamiento de los datos que realiza el programa sobre matrices y desde ficheros que contienen capas de nubes de puntos.

### II.a. CONFIGURACIÓN INICIAL DEL PROGRAMA. CARGAR FICHEROS.

*function varargout = slicesnavigator(varargin)*

El programa creado en MATLAB “slicesnavigator” es un formato .m que hace una llamada a la interfaz previamente diseñada “slicesnavigator.fig”.



“slicesnavigator”, por sí mismo, crea un nuevo “slicesnavigator” o plantea el singleton (patrón de diseño, instancia única) existente.

Se realiza un proceso de inicialización.

*slicesnavigator\_OpeningFcn*

Se ejecuta justo antes que “slicesnavigator” sea visible. Esta función no tiene argumentos de salida:

- hObject: manejar la figura.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.
- varargin: argumentos de línea de comandos para “slicesnavigator”.

Realiza los siguientes procesos:

- Selecciona la línea de comandos por defecto de salida para “slicesnavigator”.
  - Inicializa la tabla de implantes.
  - Inicializa la tabla de mandíbula.
  - Estructura de manejo actualizada.



### function varargout

Las salidas de esta función:

- varargout: matriz de celdas para devolver argumentos de salida.
- hObject: manejar la figura.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

Obtiene la línea de comandos predeterminada de salida de la estructura de manejo.

### function seleccion\_objeto

Usada para aquellas zonas que no pertenecen al modelo y que aparecen en capas, debido a defectos del archivo .stl.

### function btnBorraObjetos\_Callback

Se ejecuta al pulsar el botón de “Borra Objetos”, y borra los objetos seleccionados con la función anterior.

- hObject: manejar la figura.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

La forma de proceder de esta función es dibujar una nueva capa restándole la parte de la capa seleccionada originalmente. Realiza los siguientes procesos:

- Busca objetos que hay que borrar.
  - Pasa el objeto a la estructura "CapasEliminados" y lo borra de "CapasValidos".
    - Busca el objeto a borrar en función del número de puntos que lo forman y su centroide.

### function slider1\_Callback

Ejecuta el movimiento deslizante.

- hObject: manejar la figura.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

Mediante cursores permite moverse en orden entre las diferentes capas del modelo cargado. Al mover a otra capa, el programa carga la función definida de dibujar capa.

### function slider1\_CreateFcn

Se ejecuta durante la creación del objeto, después de seleccionar todas las propiedades.

- hObject: manejar el deslizador 1.
- handles: vacío (no se crea hasta que todas las “CreateFcns” son llamadas).



#### *function tbImplantes\_CellEditCallback*

Se ejecuta cuando se introducen datos en las celdas editables en “tbImplantes”.

- hObject: manejar la función “tbImplantes”.
- Eventdata: estructura con los siguientes campos:
  - Indices: fila y columna de los índices de la celda(s) editada(s).
  - PreviousData: datos anteriores de la celda(s) editada(s).
  - EditData: cadena(s) introducida por el usuario
  - NewData: EditData o su forma convertida establece en la propiedad de datos. Vacío si los datos no se han modificado.
  - Error: cadena de error cuando no pudo convertir EditData al valor apropiado para datos.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

Finalmente esta función hace una llamada a la función de dibujo de capa “dibuja\_capa”.

#### *function dibuja\_capa*

Realiza las siguientes operaciones:

- Dibujar la capa indicada.
- Comprueba que elementos se han de dibujar (mandíbula, eliminados, nervio,...).
- Dibujar mandíbula.
- Dibujar eliminados.
- Dibujar nervios.
- Asocia a todos los elementos dibujados la función “seleccion\_objeto”.
- Dibujar implantes.
  - Comprobar si alguna capa del implante coincide con la dibujada de la mandíbula.
    - Ver si hay que dibujar el implante.
      - Actualiza tabla implantes.
      - Dibuja implante.
    - Ver si hay que dibujar la región de búsqueda.
    - Actualiza tabla implantes.

#### *function btnResetCapa\_Callback*

Se ejecuta al presionar el botón “Resetear Capa”.

- hObject: manejar “btnResetCapa”.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

Realiza los siguientes procesos:

- Reset eliminados.
- Reset nervios.



#### function btnRestauraObjetos\_Callback

Se ejecuta al presionar el botón de “Restaurar Objetos”.

- hObject: manejar “btnRestauraObjetos”.
- handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

Realiza los siguientes procesos:

- Busca objetos que hay que borrar.
  - Pasa el objeto a la estructura "CapasEliminados" y lo borra de "CapasValidos".
    - Busca el objeto a borrar en función del número de puntos que lo forman y su centroide.

#### function handles

Realiza el siguiente proceso:

- Borra la región seleccionada en todas las capas.
  - Rango de búsqueda = 1.5\*Porcentaje (0-300).

#### function handles

Realiza el siguiente proceso:

- Restaura objetos borrados de otras capas si la opción está activada.
  - Rango de búsqueda = 1.5\*Porcentaje (0-300).

#### function tblMandibula\_CellEditCallback

Se ejecuta cuando se introducen datos en las celdas editables en “tblMandibula”.

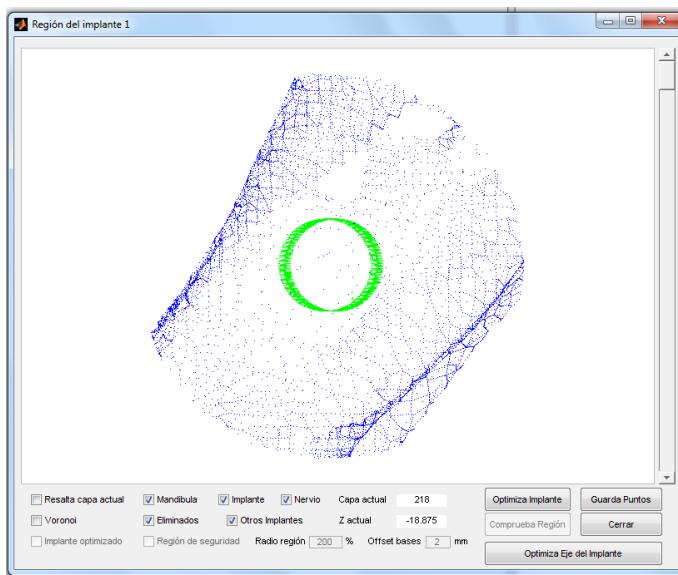
- hObject: para manejar “tblMandibula”.
- Eventdata: estructura con los siguientes campos.
  - Indices
  - PreviousData
  - EditData
  - NewData
  - Error
- Handles: estructura de gestión y datos de usuario.



## II.b. INTERFAZ DE ACCESO A PROCEDIMIENTOS DE OPTIMIZACIÓN.

### function representacion3D

Representa la región del implante seleccionado. La función realiza varios pasos:



- Crea la ventana que contendrá a la figura.
- Comprueba el número de capas y los rangos de Z de la región exportada.
- Define el tamaño y posición de la ventana nueva.
- Crea los ejes que contendrán a la figura 3D.
- Permite el giro de la figura.
- Botón para cerrar la ventana.
- Botón para guardar los puntos dentro de la región del implante.
- Botón para exportar los datos del implante (ejes).
- Botón para comprobar puntos dentro de la región de seguridad.
- Controles para la selección de objetos a mostrar en la figura 3D.
- Dibuja la figura 3D.

### function guarda\_ptos

Guarda los puntos dentro de la región del implante en archivos.

### function exportaImpl

Realiza varios pasos:

- Calcula el rango de Z y el rango de capa del implante.
- Muestra el cuadro preguntando por el límite de capas para exportar el implante.
- Comprueba que los límites de capas son válidos.
- Define el tamaño y posición de la ventana nueva.
- Nueva ventana.
- Crea los ejes que contendrán a la figura 3D.



- Permite el giro de la figura.
- Checkboxes para determinar la visualización de los implantes y los puntos de Voronoi.
- Botón para cerrar la ventana.
- Botón para guardar las características del nuevo implante.
- Crea barra de espera.
- Calcula los centros del implante en las capas seleccionadas.
- Ptos del implante que están entre las dos capas seleccionadas.
- Aproximación de un punto en el eje del implante.
- Aproximación del vector que define el eje del implante.
- Aproximación del radio del implante.
- Aproxima por mínimos cuadrados los puntos del implante a un cilindro 3D.
- Proyecta los puntos de las capas límite en el eje del cilindro y busca el máximo y el mínimo de los proyectados.
- Calcula el mejor punto de Voronoi para cada capa (proyección del centro del implante en la capa a la línea de Voronoi).
  - Calcula para cada capa las distancias mínimas de las paredes de la mandíbula al centro del implante real.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula de la capa al centro del implante.
  - Ordena de menor a mayor las distancias de los puntos de la mandíbula al centro del implante junto con las coordenadas de la mandíbula.
  - Toma el punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Toma el primer punto de los puntos de la mandíbula ordenados ascendente mente con respecto a las distancias mínimas de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante, cuya distancia al punto más próximo al centro del implante es mayor que la distancia entre el punto más próximo al centro del implante y el centro del implante.
  - Calcula la distancia entre los dos puntos próximos y el centro del implante.
- Calcula la línea que se aproxima a los mejores ptos de Voronoi
- Calcula el implante ajustado al nuevo eje (cilindro).
- Calcula la distancias mínimas entre las paredes de la mandíbula y el centro del implante optimizado.
  - Calcula la intersección del eje del implante optimizado con la capa.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula de la capa al centro del implante.
  - Ordena de menor a mayor las distancias de los puntos de la mandíbula al centro del implante junto con las coordenadas de la mandíbula.
  - Toma el punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.



- Toma el primer punto de los puntos de la mandíbula ordenados ascendenteamente con respecto a las distancias mínimas de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante, cuya distancia al punto más próximo al centro del implante es mayor que la distancia entre el punto más próximo al centro del implante y el centro del implante.
- Calcula la distancia entre los dos puntos próximos y el centro del implante.
- Matriz con las distancias entre las paredes de la mandíbula y los implantes (real y optimizado).
- Matriz con las coordenadas del implante optimizado. Las dos primeras filas son las coordenadas del eje del cilindro.
- Guarda los resultados de la optimización del implante en el “UserData” del botón “btn\_impl\_fig”.
- Info del nuevo implante.
- Botón para obtener información de la nueva posición del implante.

#### function imploptim\_callback

Realiza varios pasos:

- Cierra la ventana actual.
- Actualiza checkboxes.
- Dibuja el implante optimizado.

#### function info\_implante

Realiza varios pasos:

nº puntos	75	Desplaz. en X (mm)	0.3834	nº capas	78
Error min. (mm)	0.0094	Desplaz. en Y (mm)	-0.2998	Capa inferior	113
Error medio (mm)	0.1656	Desplaz. en Z (mm)	0	Capa superior	190
Error máx. (mm)	0.4655	Giro en X (º)	2.3843	Z inferior (mm)	-32.0000
STD	0.1078	Giro en Y (º)	2.6641	Z superior (mm)	-22.3750
		Giro en Z (º)	0.1712		

Distancias de la mandíbula a los centros de los implantes (mm)						
Altura z	D.real 1	D.real 2	Dif. real	D.optim. 1	D.optim. 2	Dif. optim.
-22.3750	2.8012	2.8834	0.0823	2.6080	3.0790	0.4710
-22.5000	2.9199	3.0827	0.1629	2.7199	3.2861	0.5662
-22.6250	3.0414	3.2790	0.2377	2.8351	3.4903	0.6552
-22.7500	3.1649	3.4328	0.2680	2.9533	3.6520	0.6987
-22.8750	3.2921	3.6030	0.3109	3.0740	3.8301	0.7561
-23.0000	3.4204	3.7649	0.3446	3.1956	3.9989	0.8033
-23.1250	3.5825	3.8869	0.3044	3.3447	4.1275	0.7828
-23.2500	3.7452	3.9593	0.2140	3.5015	4.2094	0.7080
-23.3750	3.9282	4.0169	0.0886	3.6770	4.2745	0.5975
-23.5000	4.0755	4.1190	0.0435	3.8587	4.3404	0.4817
-23.6250	4.1351	4.3116	0.1765	4.0425	4.4072	0.3648
-23.7500	4.1955	4.5057	0.3102	4.2279	4.4748	0.2469
Minimo	2.8012	2.8834	0.0435	2.6080	3.0790	0.0038
Media	4.4201	5.4727	1.0525	4.7900	5.1115	0.3215
Máximo	4.6892	6.0462	1.8559	5.2921	5.5742	0.8033
Desv.Est.	0.4405	0.8088	0.4104	0.6778	0.5724	0.2111

Cerrar

- Datos a mostrar.
- Define el tamaño y posición de la ventana nueva.
- Nueva ventana.
- Tabla para mostrar los errores de aproximación del eje.



- Tabla para mostrar los datos de modificación del eje del implante.
- Tabla para mostrar los datos de las capas usadas en el cálculo.
- Tabla para mostrar los datos de las distancias de los implantes a la mandíbula.
- Tabla para mostrar los datos de las distancias de los implantes a la mandíbula (min,max,mean,std).
- Botón para cerrar la ventana.

*function implante\_final*

*function dibuja3d*

Realiza varios pasos:

- Dibuja la figura 3D.
- Comprueba los checkbox para ver que hay que dibujar.
- Comprueba el rango de Z.
- Actualiza los contadores de capa y Z de la ventana.
- Calcula el área media del implante seleccionado.
- Dibuja los puntos de voronoi, el centro del implante y el punto de voronoi más próximo.
  - Compara el área del implante en la capa con el área media del implante.
  - Dibuja los puntos de Voronoi.
    - Centro del implante proyectado en la línea de Voronoi.
- Dibuja mandibula.
- Dibuja eliminados.
- Dibuja otros implantes.
- Dibuja el implante seleccionado.
- Dibuja el implante optimizado.
- Dibuja el implante optimizado.
- Dibuja la región de seguridad en torno al implante optimizado.
  - Dibuja los puntos de la mandíbula y del resto de implantes que están dentro de la región de seguridad.
- Controla el tamaño de la ventana donde se dibujan los puntos.

*function test\_region*

Realiza varios pasos:

- Comprueba que puntos de la mandíbula de otros implantes están dentro de la región de seguridad del implante optimizado.
- Comprobación de los puntos de la mandíbula.
  - Calcula la proyección del punto en el eje del cilindro que forma la región de seguridad.
  - Comprueba si la proyección está dentro del eje.
    - Comprueba si el punto está dentro del cilindro que forma la región de seguridad.



- Comprobación de los puntos de otros implantes.
  - Calcula la proyección del punto en el eje del cilindro que forma la región de seguridad.
  - Comprueba si la proyección está dentro del eje.
    - Comprueba si el punto está dentro del cilindro que forma la región de seguridad.
- Borra los puntos marcados (amarillos) si se ha hecho una comprobación previa.
- Dibuja los puntos que están dentro de la región de seguridad.

*function chkBorradoCapas\_Callback*

Se ejecuta al presionar el botón “chkBorradoCapas”.

- hObject: manejar “chkBorradoCapas”.
- Handles: estructura con datos de manejo y de usuario.

*function chkRegionMovil\_Callback*

Se ejecuta al presionar el botón “chkRegionMovil”.

*function btnResetTodo\_Callback*

Se ejecuta al presionar el botón “btnResetTodo”.

- Crea una copia de la estructura Capas (mandíbula) para los elementos no borrados.
- Crea una copia de la estructura Capas (mandíbula) para los elementos borrados.
- Vacía todos los objetos de la estructura (mandíbula) para los elementos borrados.

*function edtRangoBusqueda\_Callback*

Limita el máximo porcentaje del rango de búsqueda 100% = 1.5 mm.

*function edtRangoBusqueda\_CreateFcn*

Se ejecuta durante la creación del objeto, después de la selección de todas las propiedades.

*function edtAreaBusqueda\_Callback*

*function edtAreaBusqueda\_CreateFcn*

Se ejecuta durante la creación del objeto, después de la selección de todas las propiedades.

*function menu\_files\_Callback*



[function menu\\_load\\_mandi\\_Callback](#)

Realiza las siguientes operaciones:

- Carga los datos de la mandíbula.
  - Crea una copia de la estructura Capas (mandíbula) para los elementos no borrados.
  - Crea una copia de la estructura Capas (mandíbula) para los elementos borrados.
  - Vacía todos los objetos de la estructura (mandíbula) para los elementos borrados.
- Guarda los datos de la mandíbula en los handles.
  - Crea una estructura igual a la de mandíbula para guardar los objetos "nervio".
- Inicializar slider.
- Inicializa la tabla de mandíbula.
- Dibuja la primera capa

[function menu\\_load\\_impl\\_Callback](#)

Realiza las siguientes operaciones:

- Guarda en handles los datos del Implante.
- Inicializa en handles los límites de capas para exportar la región del Implante.
- Inicializa la tabla de implantes.
- Dibuja la primera capa.
- Habilita los controles para poder trabajar.

[function menu\\_load\\_nerv\\_Callback](#)

[function menu\\_load\\_elim\\_Callback](#)

[function menu\\_save\\_mandi\\_Callback](#)

[function menu\\_save\\_nerv\\_Callback](#)

[function menu\\_save\\_elim\\_Callback](#)

[function menu\\_zona\\_impl\\_Callback](#)

[function menu\\_limite\\_capas\\_Callback](#)

Realiza las siguientes operaciones:

- Muestra el cuadro preguntando por los límites de capas para exportar la región del un Implante.
- Comprueba si los límites son válidos.
- Guarda los valores en la variable handles.



#### function menu\_exporta\_impl\_Callback

Realiza las siguientes operaciones:

- Muestra en 3D y guarda los puntos dentro de la región del implante elegido
- Muestra el cuadro preguntando por el número de implante a exportar.
- Comprueba que el número de implante es válido.
- Define la región de optimización asociada al implante.
- Crea una matriz con los puntos x,y,z del implante.
- Busca las límites del implante en las capas de la mandíbula.
- Ajusta los offset de los límites de capas para exportar.
- Calcula el número de capas de la mandíbula en la región y los límites en Z.
- Crea un matriz 3D con todos los puntos de los otros implantes que están dentro de la región del implante "xyz\_region\_implantes".
- Crea un matriz con todos los puntos de la mandibula válidos que están dentro de la región del implante y los puntos correspondientes a las secciones de Voronoi.
- Crea un matriz con todos los puntos de la mandibula eliminados que están dentro de la región del implante.

#### function btnDefNervio\_Callback

Se ejecuta al presionar el botón "btnDefNervio".

- Busca objetos que hay que convertir en nervio.
  - Convierte en nervio elementos de otras capas si la opción está activada.
  - Pasa el objeto a la estructura "CapasNervios" y lo borra de "CapasValidos".
    - Busca el objeto a convertir en nervio en función del número de puntos que lo forman y su centroide.

#### function handles

Devuelve "handles", sino al volver a la función origen se pierden las modificaciones hechas a "handles", aunque se haya usado "guidata". Los handles de la función origen machacan a los nuevos "handles".

- Convierte en nervio la región seleccionada en todas las capas.
  - Rango de búsqueda = 1.5\*Porcentaje (0-300).

#### function btnDefMandi\_Callback

Se ejecuta al presionar el botón "btnDefMandi".

- Busca objetos que hay que borrar.
  - Pasa el objeto a la estructura "CapasEliminados" y lo borra de "CapasValidos".
    - Busca el objeto a borrar en función del número de puntos que lo forman y su centroide.



## II.c. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.

*function optimiza\_impl*

Ejecuta el algoritmo de la optimización según el criterio de Voronoi.

- Calcula el rango de Z y el rango de capa del implante.
- Muestra el cuadro preguntando por el límite de capas para exportar el implante.
- Comprueba que los límites de capas son válidos.
- Define el tamaño y posición de la ventana nueva.
- Crea los ejes que contendrán a la figura 3D.
- Permite el giro de la figura.
- Checkboxes para determinar la visualización de los implantes y los puntos de Voronoi.
- Botón para cerrar la ventana.
- Botón para guardar las características del nuevo implante.
- Crea barra de espera.
- Calcula los límites de Z que se corresponden a los límites de capa elegidos.
- Calcula los centros del implante en las capas seleccionadas.
- Calcula los puntos del implante que están entre las dos capas seleccionadas.
- Proyecta los puntos de las capas límite en el eje del cilindro y busca el máximo y el mínimo de los proyectados.
- Calcula el mejor punto de Voronoi para cada capa (proyección del centro del implante en la capa a la línea de Voronoi).
- Calcula para cada capa las distancias mínimas de las paredes de la mandíbula al centro del implante real.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula de la capa al centro del implante.
  - Ordena de menor a mayor las distancias de los puntos de la mandíbula al centro del implante junto con las coordenadas de la mandíbula.
  - Toma el punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Toma el primer punto de los puntos de la mandíbula ordenados ascendenteamente con respecto a las distancias mínimas de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante, cuya distancia al punto más próximo al centro del implante es mayor que la distancia entre el punto más próximo al centro del implante y el centro del implante.
  - Calcula la distancia entre los dos puntos próximos y el centro del implante.
- Calcula la línea (eje del implante) que se aproxima a los mejores puntos de Voronoi.
- Calcula el implante ajustado al nuevo eje (cilindro).
- Calcula las distancias mínimas entre las paredes de la mandíbula y el centro del implante optimizado.
  - Análogamente al cálculo del caso para el implante real.
- Matriz con las distancias entre las paredes de la mandíbula y los implantes (real y optimizado).



- Matriz con las coordenadas del implante optimizado.
- Guarda los resultados de la optimización del implante en el “UserData” del botón “btn\_impl\_fig”.
- Botón para obtener información de la nueva posición del implante.

*function Optimiza\_eje*

Optimiza el eje del implante de acuerdo a las capas seleccionadas. Los parámetros a variar durante la optimización son los valores iniciales de planificación dentista.

- Calcula el rango de Z y el rango de capa del implante.
- Muestra el cuadro preguntando por el límite de capas para exportar el implante.
- Comprueba que los límites de capas son válidos.
- Crea barra de espera.
- Define el tamaño y posición de la ventana nueva.
- Crea los ejes que contendrán a la figura 3D.
- Permite el giro de la figura.
- Calcula el centro del implante en la capa primera (inferior seleccionada):
  - Calcula los límites de Z que se corresponden a los límites de capa elegidos.
  - Calcula los centros del implante en las capas seleccionadas.
- Aproximación del vector que define el eje del implante.
- Inicializa el vector a optimizar.
- Calcula las distancias por capa del centro del implante inicial a la mandíbula.
  - Calcula en cada capa el punto del implante.
  - Calcula para cada capa las distancias mínimas de las paredes de la mandíbula al centro del implante real.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula de la capa al centro del implante.
  - Ordena de menor a mayor las distancias de los puntos de la mandíbula al centro del implante junto con las coordenadas de la mandíbula.
  - Toma el punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Calcula la distancia de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante.
  - Toma el primer punto de los puntos de la mandíbula ordenados ascendente con respecto a las distancias mínimas de todos los puntos de la mandíbula al punto de la mandíbula más próximo al centro del implante, cuya distancia al punto más próximo al centro del implante es mayor que la distancia entre el punto más próximo al centro del implante y el centro del implante.
  - Calcula la distancia entre los dos puntos próximos y el centro del implante.
- Lanza el procedimiento de optimización.
- Trabaja con el vector ya optimizado.
- Calcula los centro del implante optimizado en las capas seleccionadas (inferior/superior).
- Calcula las distancias por capa del centro del implante a la mandíbula para el implante optimizado final.



- Calcula las distancias mínimas entre las paredes de la mandíbula y el centro del implante optimizado en cada capa:
  - Análogamente al cálculo del caso para el implante real.
- Puntos del implante que están entre las dos capas seleccionadas.
  - Aproximación de un punto en el eje del implante.
  - Aproximación del vector que define el eje del implante.
  - Aproximación del radio del implante.
  - Aproxima por mínimos cuadrados los puntos del implante a un cilindro 3D.
- Proyecta los puntos de las capas límite en el eje del cilindro y busca el máximo y el mínimo de los proyectados.
- Cierra la barra de espera.
- Dibuja implante y eje original.
- Calcula la línea (eje del implante).
- Gira los puntos previamente trasladados respecto al vector.
- Matriz con las distancias entre las paredes de la mandíbula y los implantes (real y optimizado).
- Botón para obtener información de la nueva posición del implante.

function [F] = FObjetivo

Se calculan los diferentes ejes que toma la función optimización hasta llegar al criterio de parada establecido.