

INGENIERÍA INVERSA APLICADA:
METODOLOGÍA Y APLICACIONES INDUSTRIALES

MARIO BETANCUR RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar por el
título de Especialista en diseño mecánico

Asesor: Francisco Botero

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACION EN DISEÑO MECANICO
MEDELLÍN
2011

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
2	METODOLOGÍA DE LA INGENIERIA INVERSA	6
2.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	7
2.2	DIGITALIZACIÓN 3D	8
2.3	PREPROCESAMIENTO Y SEGMENTACIÓN	11
2.4	RECONSTRUCCION DE SUPERFICIES	13
2.5	PARAMETROS DE EVALUACIÓN	15
3	APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INGENIERIA INVERSA	16
3.1	DESARROLLO DE PRODUCTOS CON SUPERFICIES LIBRES	16
3.1.1	Definición del problema	16
3.1.2	Adquisición de la geometría	16
3.1.3	Procesamiento de la geometría e integración de modelo CAD	17
3.1.4	Fabricación de prototipo	18
3.2	VERIFICACIÓN DIMENSIONAL	19
3.2.1	Definición del problema	19
3.2.2	Adquisición de la geometría	19
3.2.3	Procesamiento de geometría e integración del modelo CAD	20
3.2.4	Proceso de verificación dimensional	21
3.3	DISEÑO MECÁNICO Y GENERACIÓN DE ENERGIA	22
3.3.1	Definición del problema	22
3.3.2	Adquisición de la geometría	22
3.3.3	Procesamiento de la geometría y reconstrucción	23
3.4	DISEÑO Y REPARACION DE MOLDES	26
3.4.1	Definición del problema	26
3.4.2	Adquisición de la geometría	26
3.4.3	Procesamiento de geometría e integración del modelo CAD	27
3.4.4	Mecanizado del molde	29
3.5	MEDICINA: MODELOS 3D TOMOGRAFIAS COMPUTARIZADAS	29
3.5.1	Definición del problema	29
3.5.2	Adquisición de la información	29
3.5.3	Procesamiento de la geometría	30
3.6	CONSERVACIÓN PATRIMONIO ARTISTICO E HISTORICO	32
3.6.1	Definición del problema	32
3.6.2	Adquisición de la geometría	32
3.6.1	Procesamiento de la geometría	32
4	CONCLUSIONES	36
5	AGRADECIMENTOS	37
6	GLOSARIO	38
7	BIBLIOGRAFÍA	40
8	NORMAS TECNICAS	42

INDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Proceso de ingeniería inversa</i>	6
<i>Ilustración 2. Ingeniería inversa en el diseño automotriz</i>	7
<i>Ilustración 3. Diagrama de flujo proceso de ingeniería inversa</i>	8
<i>Ilustración 4. Escaneando láser de producto</i>	16
<i>Ilustración 5. Imágenes de rango</i>	17
<i>Ilustración 6. Imágenes de rango registradas</i>	17
<i>Ilustración 7. Modelo de superficie reconstruida</i>	18
<i>Ilustración 8. Nube de puntos producto geometría libre</i>	18
<i>Ilustración 9. Objeto original y prototipo de objeto modificado</i>	18
<i>Ilustración 10. Escaneado de horma de calzado</i>	19
<i>Ilustración 11. Nube de puntos de horma de calzado</i>	19
<i>Ilustración 12. Malla poligonal horma de calzado</i>	20
<i>Ilustración 13. Superficie de horma reconstruida</i>	20
<i>Ilustración 14. Modelo de segunda horma de calzado deformada</i>	21
<i>Ilustración 15. Horma uno y dos registradas para verificación dimensional</i>	21
<i>Ilustración 16. Comparación dimensional de dos modelos</i>	22
<i>Ilustración 17. Imágenes de rango cangilón Pelton</i>	23
<i>Ilustración 18. Integración de malla triangular</i>	23
<i>Ilustración 19. Generación de curvas NURBS</i>	24
<i>Ilustración 20. Generación de superficies NURBS</i>	24
<i>Ilustración 21. Ensamble de rueda Pelton</i>	24
<i>Ilustración 22. Vista general rueda Pelton</i>	25
<i>Ilustración 23. Producto molde de inyección – silla</i>	26
<i>Ilustración 24. Digitalización de contacto – Máquina CNC –</i>	27
<i>Ilustración 25. Triangulación y registro de las imágenes de rango</i>	27
<i>Ilustración 26. Malla poligonal</i>	28
<i>Ilustración 27. Malla poligonal de cierre y cavidad</i>	28
<i>Ilustración 28. Modelo CAD estándar exportado a modelador paramétrico 3D</i>	29
<i>Ilustración 29. Información tomografía computarizada miembros inferiores</i>	30
<i>Ilustración 30. Superficie malla poligonal tejido óseo</i>	30
<i>Ilustración 31. Superficie malla poligonal piel</i>	31
<i>Ilustración 32. Integración modelo CAD</i>	31
<i>Ilustración 33. Imágenes de rango</i>	32
<i>Ilustración 34. Registro de imágenes de rango</i>	33
<i>Ilustración 35. Integración de imágenes de rango</i>	33
<i>Ilustración 36. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con borde</i>	33
<i>Ilustración 37. Textura capturada por el escáner 3D</i>	34
<i>Ilustración 38. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold Textura capturada con escáner 3D</i>	34
<i>Ilustración 39. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con Textura mejorada a partir de herramientas computacionales</i>	35
<i>Ilustración 40. Comparativo textura capturada escáner laser 3D y textura procesada con software de ingeniería inversa.</i>	35

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Equipos de digitalización</i>	<u>10</u>
---	-----------

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería inversa consiste en la captura y procesamiento de la información geométrica en tres dimensiones de un objeto físico. El proceso de captura de información geométrica se conoce como digitalización 3D, y el procesamiento de datos se denomina reconstrucción de superficies.

En la digitalización se pueden utilizar calibradores y galgas para medir la geometría si esta no es muy compleja, pero si la geometría presenta un alto grado de complejidad es necesario aplicar técnicas más avanzadas que utilizan escáner láser, ultrasonido, reconocimiento de imágenes o digitalizadores de contacto [4].

La reconstrucción de superficies toma la información 3D adquirida, y por medio de herramientas CAD genera un modelo computacional tridimensional que puede ser manipulado de acuerdo a las necesidades de diseño, manufactura y análisis.

La ingeniería inversa a nivel investigativo y académico es una disciplina en evolución tecnológica permanente, y a nivel industrial ha crecido su aplicación en consecuencia al estado de madurez alcanzado por los sistemas de captura de información tridimensional y los paquetes de procesamiento computacionales disponibles en la actualidad.

A nivel mundial, la ingeniería inversa es una disciplina que representa una revolución en los procesos de desarrollo de productos. Ejemplos de esto son el diseño de moldes, el diseño mecánico, diseño de productos, inspección de productos, aplicaciones médicas y preservación de objetos artísticos e históricos entre otras [3].

El potencial de esta técnica radica en la necesidad del desarrollo de nuevos productos en un mundo industrial cada vez más tecnológico, competitivo y globalizado, donde la diversidad de productos, unido con los ciclos de vida cada vez más cortos y el aumento de las exigencias de calidad, hacen necesaria la optimización de los tiempos y los costos asociados a los procesos de investigación, desarrollo e innovación en las empresas productivas.

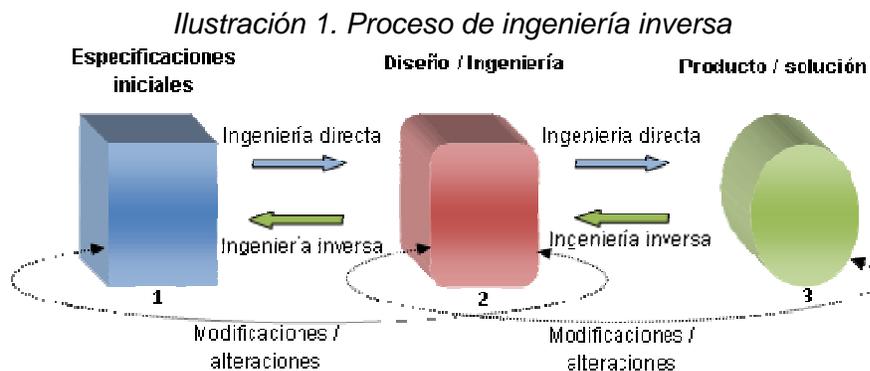
La presente monografía integra la metodología y algunas aplicaciones de la ingeniería inversa a escala industrial partiendo de la investigación académica hasta la implementación para mejorar el desarrollo de los procesos de manufactura y producción industrial.

El autor espera que las experiencias expuestas en el presente texto sean de utilidad al lector interesado, para comprender la práctica de la ingeniería inversa y el potencial de esta técnica en los diferentes sectores industriales.

2 METODOLOGÍA DE LA INGENIERIA INVERSA

La ingeniería inversa es una metodología utilizada como complemento en el diseño y manufactura de productos y artefactos, especialmente cuando estos elementos están compuestos por superficies libres ó complejas.

La ingeniería inversa como su nombre lo indica, es el inverso de los métodos convencionales de diseño. En la *Ilustración 1. Proceso de ingeniería inversa* se muestran las diferencias de los dos tipos de ingeniería: El procedimiento convencional se realiza por métodos de ingeniería concurrente, donde se desarrolla un producto a partir de unas especificaciones y exigencias previas (1), que permitirá generar un diseño inicial (2) para plasmar el concepto del producto y así fabricar lo buscado (3), con la característica de ser un proceso muy lento de desarrollo que requiere de estudios especializados y con la posibilidad de no cumplir con las expectativas del consumidor.



Por el contrario, la ingeniería inversa parte del producto final (3) y mediante la obtención de datos con equipos de alta tecnología y de manufactura avanzada consigue el diseño del producto (2) que será modificado según las exigencias y especificaciones del nuevo concepto y producirlo con éxito (3), con la característica de ser un proceso rápido (ya que parte de una solución), podrá introducir formas y geometrías libres que combinan precisión, disminución del tiempo de diseño y manufactura, reducción de costos de fabricación y desperdicios en proceso de diseño, lo cual ayuda a que las empresas manufactureras sean más eficientes en sus nuevos desarrollos en busca de una mayor competitividad.

Cuando se habla del proceso de diseño con ingeniería inversa, no se habla de una nueva forma de hacer las cosas, sino al conjunto de herramientas, conocimiento y tecnología que permiten complementar el proceso de diseño en ingeniería enmarcados bajo herramientas computacionales, equipos de medición y sistemas de manufactura avanzada.

El presente capítulo muestra el proceso general de ingeniería inversa, describe la digitalización 3D, reconstrucción de superficies e integración del modelo CAD, y se refiere a los parámetros de evaluación de un proyecto de ingeniería inversa.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

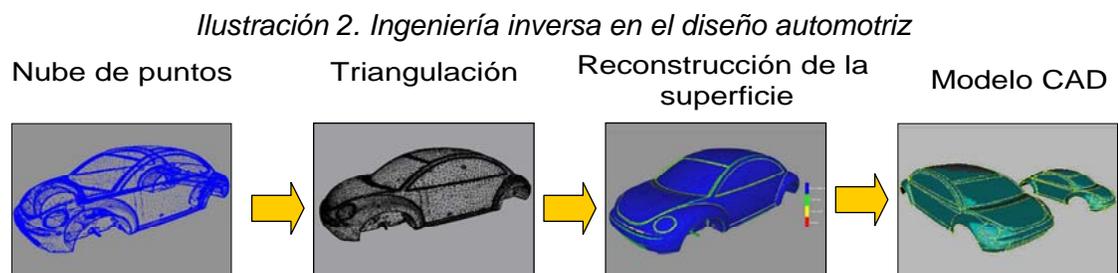
La ingeniería inversa permite la captura, representación y reproducción de modelos de productos a partir de la manipulación de información tridimensional en un computador. El proceso de ingeniería inversa implica la medición de un objeto físico para describir su geometría con una precisión requerida y así lograr una reproducción del objeto que mantenga en todo momento sus características funcionales. Es posible aplicar la ingeniería inversa usando calibradores y galgas de medición si la geometría no es muy compleja. Sin embargo, la reproducción de un objeto de geometría compleja necesita la aplicación de técnicas de un carácter más avanzado.

El proceso de la ingeniería inversa se compone de dos etapas: la digitalización 3D del objeto físico, y la reconstrucción de superficies mediante la aplicación de sistemas CAD/CAM/CAE especializados para la ingeniería inversa.

El modelo CAD obtenido puede ser manipulado de acuerdo a las necesidades del diseño, y generalmente se procede a la manufactura del objeto empleando herramientas CAM, maquinado CNC y sistemas de Prototipado Rápido.

El proceso de ingeniería inversa definido desde la digitalización hasta la reproducción del objeto permite finalmente un desarrollo más rápido del producto acompañado de una reducción de costos.

La aplicación de la ingeniería inversa en el diseño de producto y mecánico es muy amplia y ha tenido especial incidencia en el diseño automotriz, aeronáutico y en el desarrollo de elementos de maquinas, entre otros. La *Ilustración 2. Ingeniería inversa en el diseño automotriz* exhibe una de las aplicaciones de la ingeniería inversa en el sector automotriz [4].

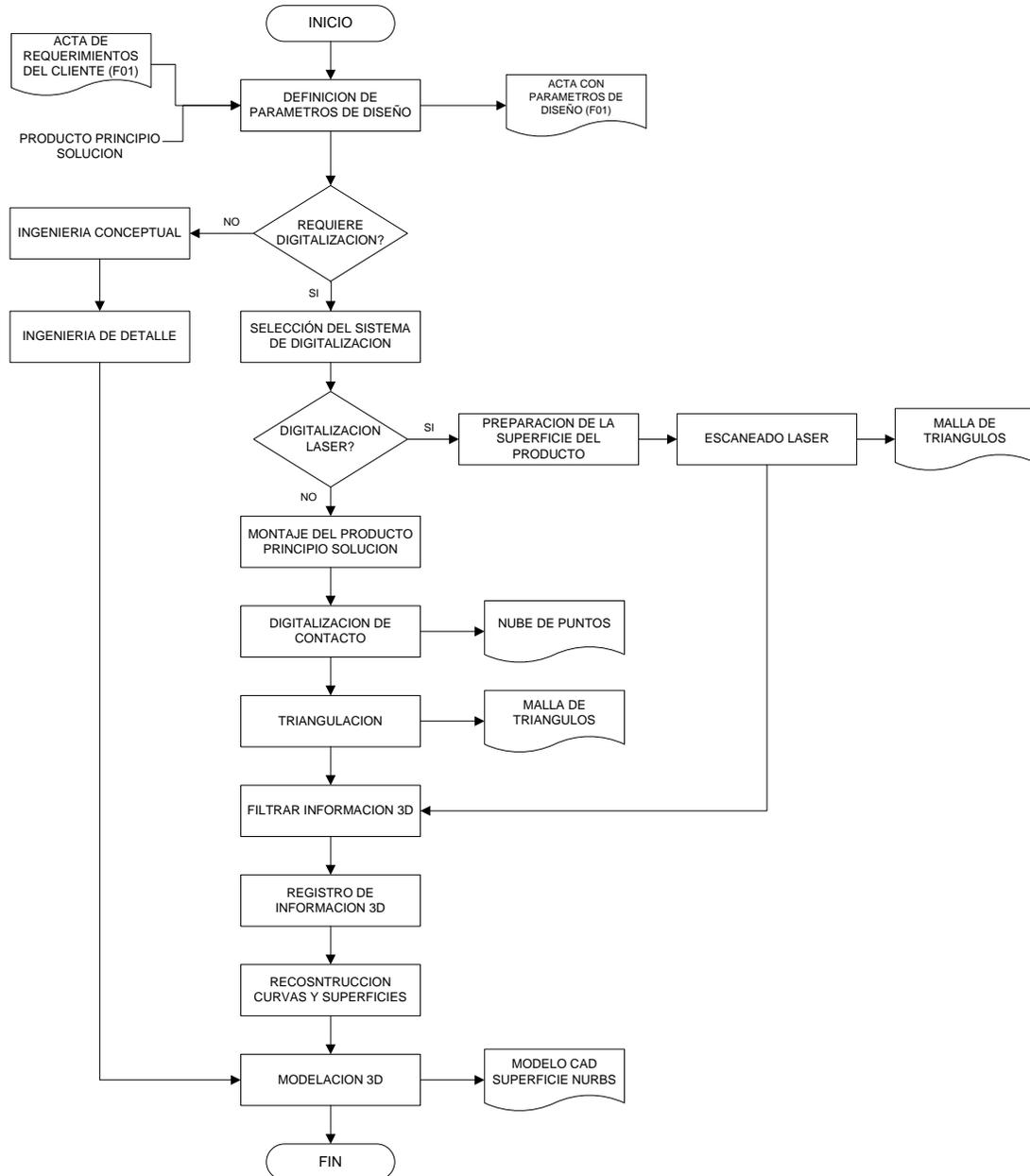


Cortesía: Advanced Man-Machine Interface Laboratory – University of Alberta

La metodología de ingeniería inversa es especialmente útil cuando se requiere trabajar con precisión, geometrías complejas, disminución de tiempo de desarrollo y evitar ensayo y error como factores incidentes en el desarrollo de un producto.

La *Ilustración 3. Diagrama de flujo proceso de ingeniería inversa* muestra un diagrama de flujo detallado del proceso de ingeniería inversa donde se integran los procesos de digitalización, reconstrucción de superficies e integración de modelo CAD [3]. En las secciones siguientes se describirán estos procesos técnicos con detalle.

Ilustración 3. Diagrama de flujo proceso de ingeniería inversa



Cortesía: DYNACAD LTDA

2.2 DIGITALIZACIÓN 3D

La digitalización 3D corresponde al proceso de captura de la información geométrica de un objeto físico mediante herramientas tecnológicas de adquisición de datos en masa como escáneres laser, digitalizadores ópticos, brazos de contacto, palpadores, mesas de medición de coordenadas y tomógrafos axiales computarizados [2].

Estos sistemas tienen como características fundamentales que pueden medir objetos en tres dimensiones y almacenan la información geométrica capturada en un ordenador para su posterior manipulación.

La selección del sistema de digitalización depende principalmente de los requerimientos de precisión, velocidad, características del material, condiciones de la superficie, tamaño del objeto y condiciones de montaje [5].

Los sistemas de digitalización de acuerdo a sus características tecnológicas tienen variaciones en costo, tamaño, versatilidad y velocidad de captura [2].

Los digitalizadores se pueden dividir en dos ramas principales que son las siguientes:

- a) Digitalizadores de contacto: Estos sistemas utilizan probetas en forma cónica y esférica para capturar la información de los objetos cuando se produce contacto con la superficie del objeto. La información es adquirida en nubes de puntos, no capturan datos de topología (Conectividad entre los puntos) y no son útiles para medir superficies deformables con la presión de contacto. Los sistemas de digitalización por contacto más conocidos son: Las mesas de medición de coordenadas (MMC), los brazos de medición y los palpadores adaptables a sistemas CNC [14].

La digitalización por contacto requiere el montaje de la pieza, de forma tal que no se generen deformaciones y que no exista posibilidad de movimiento en el momento de tocar la pieza con la punta de digitalización.

- b) Digitalizadores de no contacto: Estos sistemas usan principios ópticos, acústicos ó magnéticos para la captura de la información. Los más utilizados a nivel industrial son el escáner laser y el escáner óptico, y en medicina se utilizan los tomógrafos axiales computarizados. Los sistemas de digitalización de no contacto permiten capturar la nube de puntos y la topología de la superficie en una malla poligonal de triángulos. Son idóneos para medir objetos deformables al no requerir el contacto. De acuerdo a su principio de funcionamiento tienen limitaciones de acuerdo a las características ópticas de la superficie (Trasparencia, reflexión y color) ó las propiedades del material en términos magnéticos [4].

Si se selecciona la digitalización laser, se deben preparar las superficies de la pieza, de forma tal que el laser pueda adquirir sin problema la información geométrica de estas superficies.

El resultado del proceso es una o varias mallas de triángulos (Imágenes de rango) que conforman la pieza, en ciertos casos puede tener ruido o superficies ajenas al objeto digitalizado, las cuales se filtran o eliminan por medio de software especializados de ingeniería inversa para tratamiento de mallas de triángulos, donde se registran y se unen para conformar una superficie poligonal única [7] [21].

Las características de los sistemas de digitalización y adquisición de información geométrica están definidos en la *Tabla 1*. Equipos de digitalización, donde se encuentran las características principales de cada uno de estos sistemas de acuerdo a su tipo [6] [12]:

Tabla 1. Equipos de digitalización

Equipo	Principio de funcionamiento	Precisión	Velocidad	Aplicaciones
Escáner Láser 3D	Barrido láser de la pieza	Variable de acuerdo a la resolución del equipo	Media	Piezas pequeñas y medianas con formas libres
Mesa de medición de coordenadas y palpadores	Palpado mecánico de las piezas por medio de una probeta sujeta a un brazo o ejes móviles	Buena	Baja	Piezas con figuras geométricas de poca forma libre
Digitalizador óptico	Tomas por medio de cámaras usando fotogrametría	Buena	Alta	Piezas de cualquier tamaño, principalmente con formas libres
TAC	Tomografías axiales computarizadas. Rayos X.	Media	Media	Medicina

El proceso de digitalización produce uno de los siguientes resultados, de acuerdo a su principio de funcionamiento:

- a) Nube de puntos segmentada: Este resultado se produce en la digitalización con brazos de medición. Los puntos son seleccionados directamente por un técnico que adquiere la información segmentada punto a punto necesaria para generar entidades geométricas de referencia como curvas, primitivas, planos y ejes para la posterior fijación de superficies que conforman el objeto 3D. La nube de puntos esta compuesta por un conjunto de puntos cartesianos 3D (x,y,z) almacenados en un archivo de texto plano.
- b) Nube de puntos no segmentada: la medición es el resultado de una muestra indiscriminada de puntos sobre la superficie del objeto. La información produce una nube de puntos cuya densidad depende del tamaño del objeto, la resolución de la digitalización y el sistema de digitalización. Generalmente estas mediciones punto a punto son realizadas con sistemas automáticos de palpado, ya que la medición debe ser indiscriminada, precisa y rápida. Los sistemas automáticos para generación de este tipo de nubes de puntos son los palpadores montados en sistemas CNC y las mesas de medición de coordenadas MMC. Los brazos de medición también pueden adquirir nubes de puntos en masa pero implican un técnico que captura la información punto a punto, esto representa tiempo y costo del personal especializado en una labor automatizable.

- c) Mallas poligonales: Los sistemas de escaneo laser y ópticos capturan los datos geométricos de nube de puntos y la conectividad entre estos puntos mediante las mallas poligonales de triángulos. La malla poligonal de triángulos almacena la información geométrica de cada punto (x,y,z) , y almacena los vértices de cada triangulo (v_i, v_j, v_k) en un orden que permite conocer la conexión entre las caras triangulares (Topología). La malla poligonal en ingeniería inversa es la primera aproximación al modelo CAD del objeto físico digitalizado grafica y matemáticamente. El objeto en malla poligonal puede ser utilizado en manufactura, prototipado rápido y en análisis de ingeniería con herramientas CAE [2].
- d) Archivos de imágenes DICOM: Los tomógrafos axiales computarizados generan imágenes de cortes sobre un cuerpo, estas imágenes utilizan una escala de colores asociada a la densidad de cada tejido, es por esto que son útiles en medicina ya que el cuerpo de los seres vivos está compuesto por diferentes tejidos como muscular, óseo y cutáneo, los cuales en un TAC aparecen discriminados en la escala de colores con valores diferentes. Cada archivo de imagen es un campo escalar en 2D, y al unir todos los cortes realizados en una muestra sobre un cuerpo se obtiene un campo escalar 3D que puede ser filtrado para generar las superficies de cada uno de los tejidos [19].

2.3 PREPROCESAMIENTO Y SEGMENTACIÓN

El preprocesamiento y la segmentación son procesos que preparan la información 3D para la reconstrucción en superficies *NURBS*, deben ser desarrolladas en paralelo dado que dependen de elementos propios de cada proyecto, tales como el tipo de información digitalizada (Nube puntos, malla poligonal ó archivos DICOM), la calidad de la información capturada (Existencia de ruido, numero de imágenes de rango, volumen de información) y estado de segmentación de la información.

El objetivo principal de esta etapa es mejorar la calidad de la información para facilitar la reconstrucción y la integración del modelo CAD [10]. El mejoramiento de la calidad de la información se logra en medida que se reduce el ruido, existe una triangulación que conecta los puntos correctamente, existe una malla única que describe el objeto y el volumen de información es suficiente para describir con precisión el objeto.

A continuación se describen los procesos que el ingeniero a cargo de un proyecto de ingeniería inversa puede desarrollar durante el preprocesamiento y segmentación de la información tridimensional.

- a) Tratamiento de Nube de puntos segmentada: Los paquetes CAD de ingeniería inversa permiten importar esta información segmentada desde la digitalización para utilizar los puntos como referencia para generar entidades geométricas como curvas, primitivas, planos y ejes necesarias en el ajuste de superficies que conforman el objeto 3D.

El trabajo del ingeniero reconstructor de superficies con este tipo de información es utilizar herramientas CAD de generación de superficies como extrusiones, revoluciones, barridos, recubrimientos y planos que integran el modelo CAD de un objeto.

- b) Tratamiento de nube de puntos no segmentada: La nube de puntos puede ser filtrada para eliminar información ruidosa de la medición, y preparar la nube de puntos para la generación de la malla triangular. La nube de puntos debe tener una muestra representativa de la superficie, y la distancia entre puntos debe ser lo más equidistante posible para realizar con éxito el proceso de mallado.
- c) Triangulación: las nubes de puntos pueden ser trianguladas mediante algoritmos que detectan la conectividad entre puntos vecinos generando la topología de caras triangulares. El algoritmo de triangulación de *Delaunay* tiene una amplia difusión en los paquetes CAD de ingeniería inversa [23] [13].
- d) Generación de contornos a partir de nube de puntos: Es un proceso en el que se segmenta la información de la nube de puntos en niveles. Los niveles tienen planos que cortan la nube de puntos y agrupan los puntos de acuerdo a la cercanía con cada uno de los planos. El objetivo es tener un conjunto de curvas de nivel que pueden ser unidas con una superficie de recubrimiento. Es una herramienta de gran utilidad para superficies que pueden ser descritas correctamente con herramientas de recubrimiento (*Loft*) y barrido (*Sweep*) [21].
- e) Tratamiento de información a partir de tomografías axiales computarizadas: Las tomografías axiales computarizadas son importadas a los software de ingeniería inversa en archivos DICOM

Los archivos DICOM contienen la información de un campo escalar tridimensional de densidades, representado con una escala de colores. El mayor trabajo en la preparación de esta información es el tratamiento de imágenes para mejorar la definición y contraste.

La extracción de una superficie de malla poligonal requiere la aplicación de un algoritmo como el *Marching cubes* [16] el cual es un método computacional que permite la manipulación de esta información. Este algoritmo divide el espacio del campo escalar en *voxels* y calcula para cada uno de ellos la superficie de intersección para un valor de umbral referencia. La superficie de nivel es consecuencia de la unión de las superficies de intersección de todos los *voxels* que conforman el campo de densidades [18][19][20].

- f) Filtro de información malla poligonal: Este proceso busca eliminar la información escaneada no perteneciente al modelo del objeto, eliminar la información ruidosa, disminuir la densidad de puntos sin disminuir significativamente la precisión requerida y eliminar caras incorrectas en la malla como caras cruzadas y *No-Manifold* [10].
- g) Segmentación: Permite dividir la malla poligonal en superficies *2-Manifold en R^3* . La segmentación requiere análisis del vecindario de las zonas de los puntos,

determinar el número de superficies *2-Manifold en R^3* presentes en la información escaneada, aristas que dividen la malla poligonal, analizar los vectores normales y la curvatura presentes en la malla poligonal [21].

- h) Registro de imágenes de rango: Los procesos de digitalización realizan múltiples escaneados a un objeto para obtener las vistas en diferentes ángulos. Las vistas capturadas se conocen como imágenes de rango (*Range pictures*), las cuales unidas generan una malla que representa la superficie visible del objeto. El registro es el proceso donde las imágenes de rango son ubicadas en posición para ser unidas (*Merge*) y formar una superficie única (*2-Manifold en R^3*) [7].

El registro se puede realizar mediante tres métodos [21]:

- Inclusión de puntos de alineación en la superficie escaneada: Son regularmente esferas de referencia que permiten alineación de las imágenes de rango mediante la traslación y rotación del objeto hasta que los puntos de las esferas coinciden. Es requerido que al menos tres esferas estén incluidas en cada imagen de rango para garantizar una solución única al cálculo de la transformación. El proceso es ejecutado por el software del escáner ó mediante el software de ingeniería inversa en caso de existir compatibilidad con el sistema de digitalización.
- Control del digitalizador: Algunos sistemas de digitalización permiten controlar un sistema global de coordenadas y los ángulos de captura de la imagen de rango. Este sistema es uno de los más precisos porque la alineación no depende de los algoritmos matemáticos del software sino exclusivamente del digitalizador.
- Algoritmos estadísticos: Los paquetes CAD de ingeniería inversa vienen dotados con métodos estadísticos que calculan las traslaciones y rotaciones de un conjunto de imágenes de rango de manera tal que la desviación (Error) entre las superficies de traslape se minimice. Estos métodos son muy útiles porque simplifican el proceso de digitalización y funcionan adecuadamente cuando las superficies digitalizadas tienen formas libres irregulares que hacen que el cálculo estadístico converja a una solución única.

2.4 RECONSTRUCCION DE SUPERFICIES

La reconstrucción del modelo, se refiere a la conversión de la malla de triángulos a superficies *NURBS* que puedan ser utilizadas en sistemas CAD/CAM/CAE. El resultado de esta fase es un modelo CAD integrado de superficies *NURBS* [22]. Ver *Ilustración 3. Diagrama de flujo proceso de ingeniería inversa* .

- a) Optimización de malla poligonal: Antes de iniciar el proceso de generación de curvas y superficies *NURBS*, es importante mejorar la malla poligonal mediante el suavizado de superficies, eliminación de agujeros, eliminación de rasgos indeseables en el diseño y mejoramiento la distribución de triángulos.
- b) Ubicación malla poligonal. La malla poligonal debe ubicarse coherente con el sistema global de coordenadas. La ubicación correcta de la malla facilita el manejo de entidades de referencia como planos, sistemas locales de coordenadas, ejes, vectores, cilindros, círculos, curvas y superficies *NURBS*,

permite la detección de planos de simetría, la utilización de los planos para generación de las curvas de nivel y es más fácil interpretar las herramientas de verificación dimensional y desviación. Los paquetes CAD vienen con herramientas que permiten trasladar y rotar el modelo para llegar a la posición correcta del proceso de reconstrucción.

- c) Detección de simetrías y arreglos. Permite simplificar el proceso reconstructivo porque en cuerpos simétricos es posible reconstruir la mitad del sólido y duplicar la solución. En arreglos lineales y radiales puede lograrse la reconstrucción de un segmento y conociendo el patrón de repetición del arreglo y los parámetros que lo gobiernan generar la solución completa del objeto.
- d) Verificación dimensional de la malla. Es recomendable verificar las dimensiones principales del objeto y la coherencia dimensional del modelo midiendo los rasgos más característicos del objeto físico, esto permite detectar errores en la digitalización, en el registro de las imágenes de rango y en la ubicación del objeto antes de iniciar con la generación de superficies *NURBS*.
- e) Definición de rasgos (*Features*). La segmentación en regiones permite detectar curvas características del modelo CAD, estas curvas en muchos casos no son de fácil extracción, dado que los objetos tienen rasgos suavizados con redondeos. El proceso de extracción de los rasgos se logra mediante algoritmos de extracción automática disponibles en los paquetes de ingeniería inversa, la extensión de dos superficies extendidas ó con la detección de curvas limitantes de la malla.
- f) Generación de curvas *NURBS*. Las curvas de rasgos permiten identificar las regiones de las superficies que tienen cambios en curvatura. Los paquetes de ingeniería inversa tienen herramientas que pueden crear las curvas interiores en las regiones de la malla poligonal, tales como curvas de nivel, curvas radiales, curvas interpoladas, curvas de frontera y curvas de referencia (Líneas y círculos).
- g) Generación de superficies *NURBS*. Los arreglos de curvas son útiles para formar superficies *NURBS*, las cuales son superficies paramétricas con parámetros u y v . Las superficies *NURBS* pueden ser recortadas (*Trimmed surfaces*) ó no recortadas (*Untrimmed surfaces*), y es posible generarlas a partir de herramientas CAD tradicionales como barrido, revolución, recubrimiento, extrusión y superficies a partir de red de curvas. Los paquetes de ingeniería inversa contienen herramientas de generación de superficies *NURBS* automáticos que son muy útiles cuando la superficies tiene rasgos suavizados, existe continuidad en los cambios en curvatura y las superficies tienen formas libres orgánicas [10].
- h) Verificación de superficies *NURBS*. Las superficies *NURBS* deben ser verificadas en calidad mediante el análisis de desviación dimensional de la superficie respecto a la malla poligonal, también deben realizarse análisis de continuidad y curvatura que garanticen la estética y funcionalidad de la reconstrucción.
- i) Integración de modelo CAD. La unión de superficies en un modelo CAD sólido es una etapa esencial de reconstrucción para garantizar la calidad del resultado final en procesos posteriores a la ingeniería inversa como la manufactura con herramientas CAM y análisis de ingeniería con herramientas CAE.
- j) Definición de detalles. Los detalles como redondeos, perforaciones, y entidades primitivas accesorias; generalmente son incluidos al final del proceso con el objetivo de no interferir con la reconstrucción de superficies *NURBS* principales y la integración del CAD.

2.5 PARAMETROS DE EVALUACIÓN

Los proyectos de ingeniería inversa requieren de los siguientes parámetros para evaluar su calidad, costo y etapas de desarrollo. Mediante ellos pueden medirse las características de los proyectos de manera cuantitativa o cualitativa.

- a) **Precisión**: Es el grado de acercamiento del modelo desarrollado con relación al objeto medido. El término precisión puede reemplazarse mejor por grado de incertidumbre, es decir, el rango en que una medida se confía que esté. Ej., si la precisión es de 0.1mm, para una medida de 10mm puede asegurarse que esté entre 9.9mm y 10.1mm.
- b) **Resolución**: Es el espaciamiento entre puntos obtenidos con el digitalizador sobre la pieza. Mientras más pequeña sea la resolución más detalles se capturan, pero aumenta considerablemente el tiempo de la operación. La resolución no tiene una relación directa con la precisión.
- c) **Rango**: es la dimensión máxima a la que se puede acceder para definir objeto de manera manufacturable. Los equipos de digitalización y manufactura tienen una limitación de distancia, por lo que un objeto largo requiere de múltiples etapas para ser desarrollado.
- d) **Tiempo**: Es la evaluación del tiempo proyectado respecto al tiempo real de ejecución.
- e) **Costo**: Es la evaluación del costo presupuestado respecto al costo real.
- f) **Manufacturabilidad**: Es una característica del producto que atribuye la posibilidad de manufacturar un diseño de acuerdo al volumen requerido por el cliente y los procesos disponibles para su fabricación.

3 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA INGENIERIA INVERSA

3.1 DESARROLLO DE PRODUCTOS CON SUPERFICIES LIBRES

Esta sección muestra el proceso de ingeniería inversa aplicado a un objeto problema (caballo) compuesto por superficies de geometría libre. El objeto debe ser digitalizado con un escáner láser 3D, se debe desarrollar reconstrucción del modelo CAD y la fabricación de un prototipo del producto modificado a una escala menor.

3.1.1 Definición del problema

La ingeniería inversa se utiliza cuando las geometrías de los productos son complejas y no son fáciles de determinar con calibradores y sistemas convencionales de medición. La meta es lograr una representación de un objeto en forma de caballo con geometría libre, integrado en un modelo CAD de superficies modificables para la fabricación de un prototipo en una escala menor. El grado de detalle depende de la resolución del escáner 3D, la cual es 0.4 mm de precisión.

3.1.2 Adquisición de la geometría

El proceso de adquisición de geometría se logra por el uso de un escáner láser 3D que captura la geometría en imágenes de rango de mallas poligonales que almacena la nube de puntos y la topología de la malla. La *Ilustración 4. Escaneando láser de producto* muestra como el objeto es escaneado mediante la incidencia de un rayo láser en la superficie, la información es capturada y exportada al software de reconstrucción de superficies. Las mallas poligonales (Imágenes de rango) del producto escaneado se muestran en la *Ilustración 5. Imágenes de rango*. El lector podrá notar que las mallas adquiridas a partir del escáner 3D no están ubicadas de manera que formen un modelo integrado del caballo original, para ello se debe desarrollar el proceso de reconstrucción de la superficie que se explica posteriormente.

Ilustración 4. Escaneando láser de producto



Ilustración 5. Imágenes de rango



3.1.3 Procesamiento de la geometría e integración de modelo CAD

La integración del modelo CAD se logra mediante el registro de las imágenes de rango, producto del proceso de escaneado. El proceso de registro es la alineación de las imágenes de rango aprovechando la zona compartida entre cada par de imágenes; en consecuencia es vital que exista un área amplia y con rasgos característicos para que exista un buen ensamble de toda la superficie del producto. El modelo de las imágenes de rango registradas se puede observar en la Ilustración 6. El modelo CAD obtenido puede ser integrado uniendo las imágenes de rango que dan como resultado la superficie de la *Ilustración 7. Modelo de superficie reconstruida*. Es posible mostrar que la superficie reconstruida contiene la nube de puntos de la *Ilustración 8. Nube de puntos producto geometría libre*.

Ilustración 6. Imágenes de rango registradas

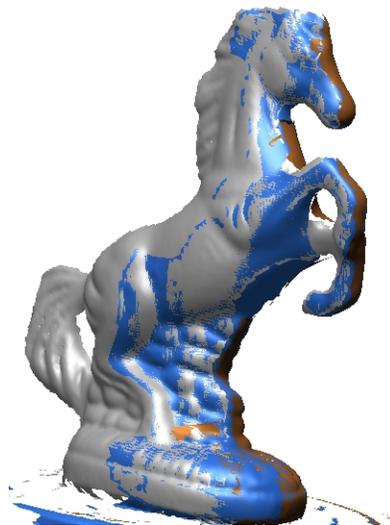


Ilustración 7. Modelo de superficie reconstruida



Ilustración 8. Nube de puntos producto geometría libre



3.1.4 Fabricación de prototipo

El modelo CAD de la malla poligonal puede ser manipulado y llevado a un modelo de superficies *NURBS*, compatible con los modeladores CAD 3D paramétricos. El modelo de superficie integrado en la *Ilustración 7. Modelo de superficie reconstruida* es modificado con un factor de escala menor y exportado a un sistema de prototipado rápido que imprime el objeto por capas. La *Ilustración 9* muestra como el modelo original puede ser modificado y reproducido; el modelo de la izquierda es el original y el derecho es el modelo modificado reproducido (Prototipo).

Ilustración 9. Objeto original y prototipo de objeto modificado



3.2 VERIFICACIÓN DIMENSIONAL

El proceso de ingeniería inversa permite digitalizar dos modelos con características similares y comparar donde existen mayores desviaciones entre ellos. Este proceso es particularmente útil para verificar dimensionalmente objetos de geometrías complejas como moldes y matrices para la producción. El proceso de verificación dimensional permite analizar fallas en los procesos de manufactura, fallas por fatiga y desgaste ó permite verificar como son las deformaciones de un objeto sometido a esfuerzos para el análisis de resultados experimentales en pruebas de ingeniería.

3.2.1 Definición del problema

El problema presentado es hipotético y plantea la reconstrucción de una horma de calzado de acuerdo a un modelo original. El modelo reconstruido será deformado para mostrar la variación dimensional respecto al modelo original.

3.2.2 Adquisición de la geometría

El proceso de adquisición de geometría se desarrolló mediante la digitalización con escáner láser 3D. La digitalización láser integra geometría y topología como se muestra en la *Ilustración 10. Escaneado de horma de calzado* y la *Ilustración 11. Nube de puntos de horma de calzado*.

Ilustración 10. Escaneado de horma de calzado



Ilustración 11. Nube de puntos de horma de calzado



3.2.3 Procesamiento de geometría e integración del modelo CAD

La superficie de la horma es integrada en un modelo CAD de superficies como se muestra en la Ilustración 13 mediante registro y unión de las imágenes de rango. Adicionalmente se deforma la superficie del modelo original como se muestra en la Ilustración 14, generando el modelo de la segunda horma. La deformación cambia la posición de algunos puntos que controlan la malla de triángulos en zonas específicas de la horma. Los dos modelos son integrados en una posición que permita verificar la variación dimensional, punto a punto como se muestra en la Ilustración 15.

Ilustración 12. Malla poligonal horma de calzado

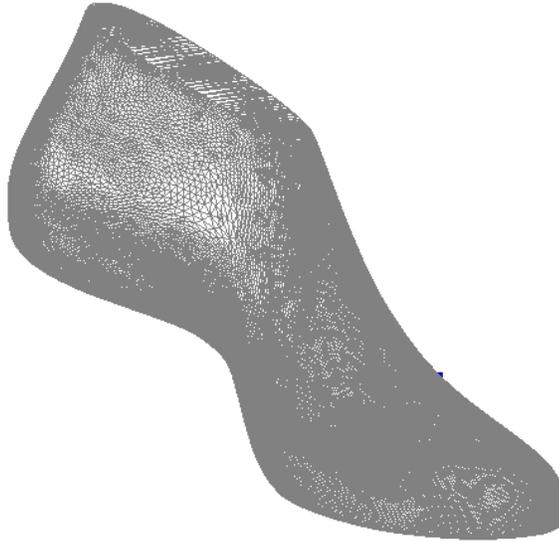


Ilustración 13. Superficie de horma reconstruida



Ilustración 14. Modelo de segunda horma de calzado deformada



Ilustración 15. Horma uno y dos registradas para verificación dimensional

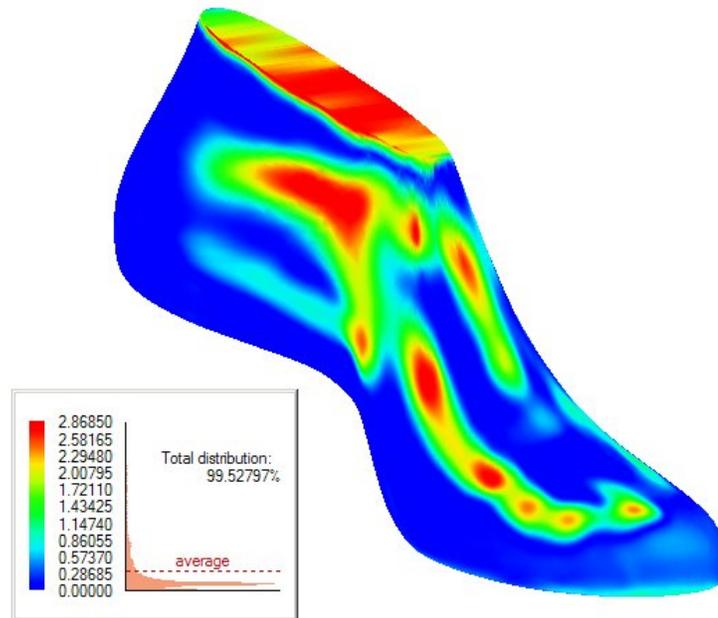


3.2.4 Proceso de verificación dimensional

Los modelos CAD de la horma reconstruida original y la horma modificada luego de ser registradas pueden compararse punto a punto para definir las zonas de mayor desviación. La Ilustración 16 muestra las desviaciones de los dos modelos existentes, mediante un mapa de colores que caracteriza la desviación entre ambas superficies. El mapa de colores permite interpretar la posición y la magnitud de la

variación dimensional. Esto es particularmente útil en procesos de inspección de calidad, medición de deformación y análisis de fallas de elementos mecánicos.

Ilustración 16. Comparación dimensional de dos modelos



3.3 DISEÑO MECÁNICO, GENERACIÓN DE ENERGIA Y SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

El diseño mecánico tiene elementos con geometrías cuya medición y modelación CAD requiere de tecnologías afines con la ingeniería inversa. El objeto digitalizado es un cangilón de rueda Pelton cortesía de la Empresa servicios industriales OCG E.U. y la digitalización es suministrada por la empresa DYNACAD LTDA.

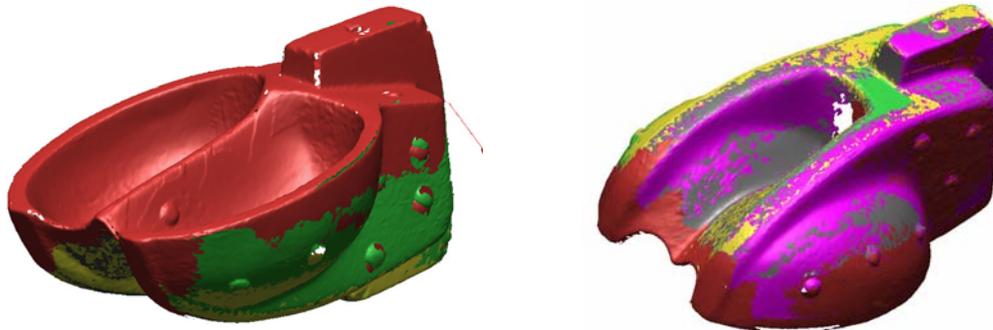
3.3.1 Definición del problema

Los cangilones de rueda Pelton contienen geometrías libres que han sido producidas a nivel nacional por métodos artesanales que implican fabricación de placas modelo para el moldeo y posterior vaciado de fundición de hierro. La obtención del modelo CAD reconstruido permite a las empresas que trabajan con estos sistemas de generación de potencia incluir herramientas que permitan análisis de ingeniería para mejorar desempeño y eficiencia del sistema. El modelo CAD reconstruido con ingeniería inversa asegura que el cangilón es totalmente simétrico, la calidad de las curvas de sección y la posibilidad de incluir procesos de manufactura CNC.

3.3.2 Adquisición de la geometría

La geometría fue adquirida con un escáner laser 3D de 0.3 mm de precisión. Las imágenes de rango obtenidas están registradas en la *Ilustración 17. Imágenes de rango cangilón*.

Ilustración 17. Imágenes de rango cangilón Pelton



3.3.3 Procesamiento de la geometría y reconstrucción

La reconstrucción de superficies se alcanza mediante la unión de las imágenes de rango escaneadas, el resultado de la unión se observa en *Ilustración 18. Integración de malla triangular*.

La malla triangular permite generar curvas *NURBS*, mediante el corte de secciones del objeto. Véase *Ilustración 19. Generación de curvas NURBS*. Las redes de curvas son utilizadas para la generación de la superficie mostrada en *Ilustración 20. Generación de superficies NURBS*.

El sólido del cangilón unido a la configuración geométrica de la rueda genera un arreglo circular del ensamble de la rueda Pelton, el cual corresponde a la integración del modelo CAD del sistema de generación de energía. Véase *Ilustración 21. Ensamble de rueda Pelton* e *Ilustración 22. Vista general rueda Pelton*. Los sólidos generados son manipulables con herramienta CAD estándar, de manera que los ingenieros pueden evaluar el diseño, manufacturar y optimizar el sistema de generación de energía.

Ilustración 18. Integración de malla triangular

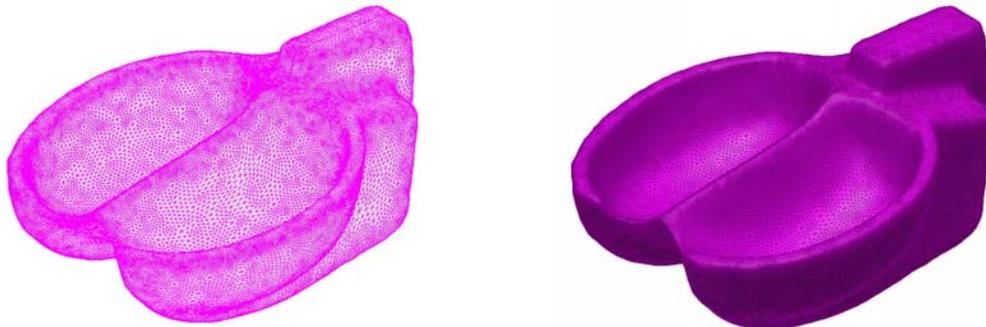


Ilustración 19. Generación de curvas NURBS

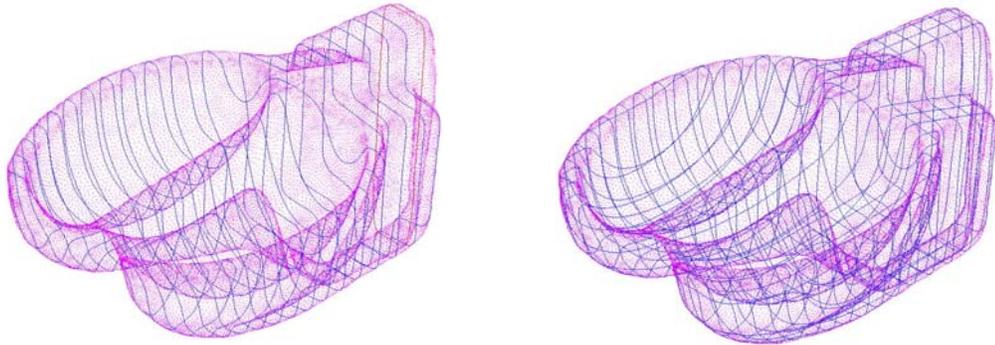


Ilustración 20. Generación de superficies NURBS

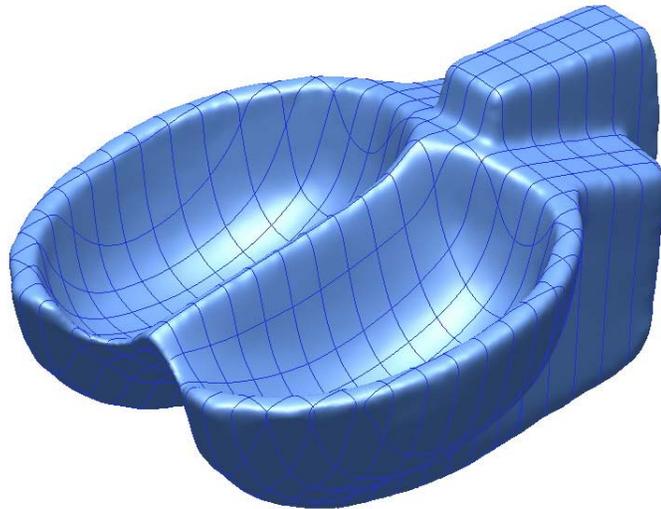


Ilustración 21. Ensamble de rueda Pelton

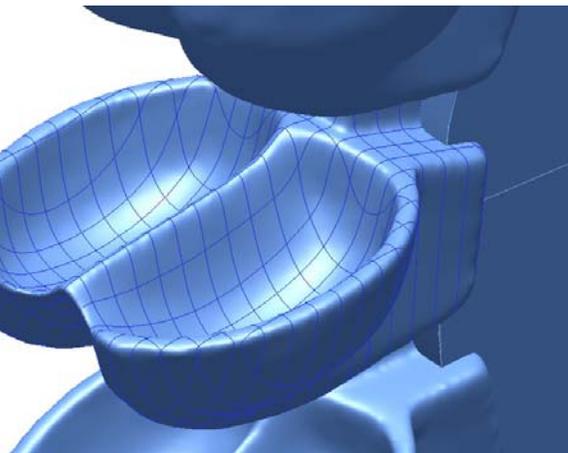
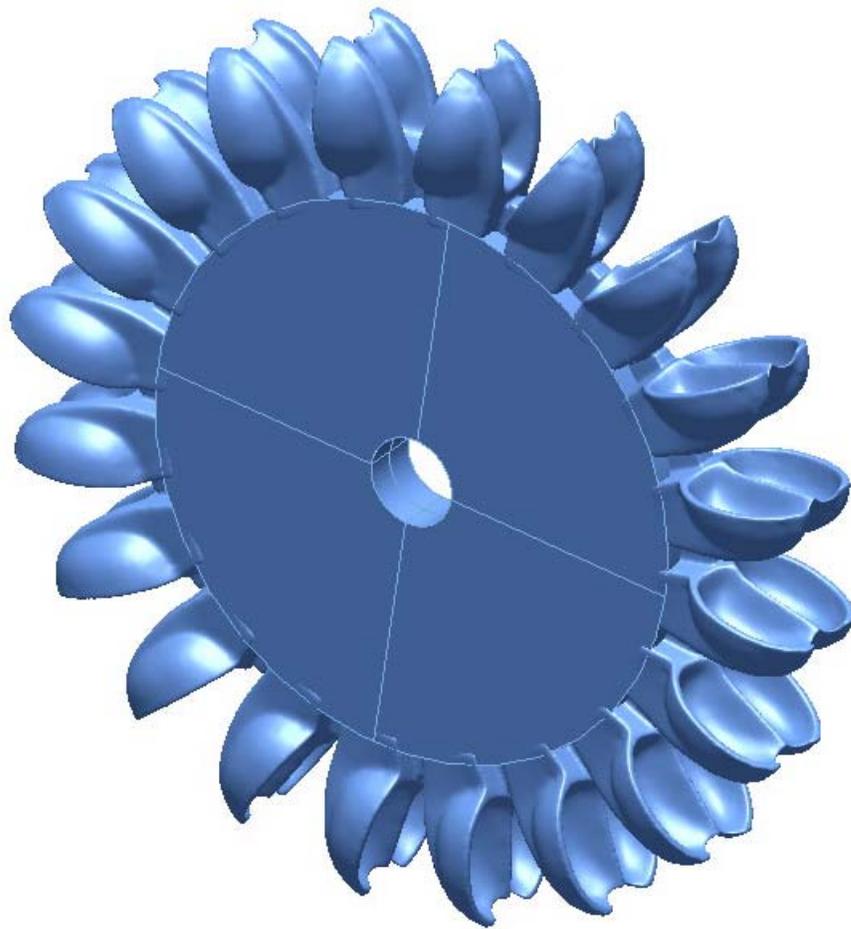


Ilustración 22. Vista general rueda Pelton



3.4 DISEÑO Y REPARACION DE MOLDES

El presente apartado describe la reparación de un molde de inyección de la empresa INDUSTRIAS ESTRA – COLOMBIA, donde se utilizó ingeniería inversa para restablecer las condiciones de operación del molde en términos de eficiencia y productividad. Es importante mencionar que el presente ejemplo fue desarrollado con el grupo GEIMA de la Universidad EAFIT (Véase agradecimientos).

3.4.1 Definición del problema

El molde al que se aplicó el proceso de ingeniería inversa presentaba problemas en la uniformidad del material, teniendo zonas donde el espesor no era constante de acuerdo a las condiciones originales de diseño. Por lo tanto el primer objetivo era lograr que el molde tuviera un espesor de pared constante. La *Ilustración 23. Producto molde de inyección – silla*, muestra el producto elaborado por el molde de inyección reparado.

La operación del molde por años de trabajo había producido deterioro en la línea de partición representado principalmente por abolladuras en la superficie de cierre; tales abolladuras producían rebabas en el producto inyectado disminuyendo la productividad por reproceso y aumentando el desperdicio de material.

Ilustración 23. Producto molde de inyección – silla



Cortesía Industrias Estra S.A.

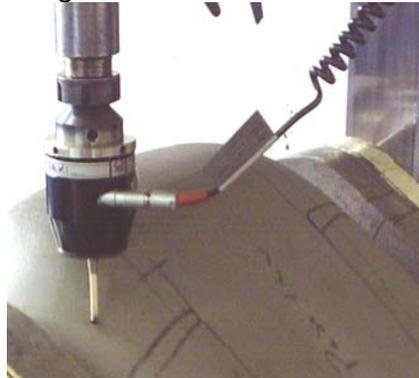
La estrategia desarrollada para solucionar el problema fue aplicar ingeniería inversa para reconstruir las cavidades del molde y la línea de cierre, garantizando estabilidad dimensional y eliminando los defectos existentes.

3.4.2 Adquisición de la geometría

La *Ilustración 24. Digitalización de contacto – Máquina CNC* – muestra el dispositivo de contacto utilizado en la aplicación del proceso de ingeniería inversa al molde. El proceso de digitalización se desarrolló por imágenes de rango, con el objetivo de hacer el trabajo de manera progresiva, no saturar la memoria de la maquina CNC y aplicar diferentes distancias de muestreo en el molde de acuerdo al nivel de detalle requerido asegurando hacer el trabajo con la mayor eficiencia posible.

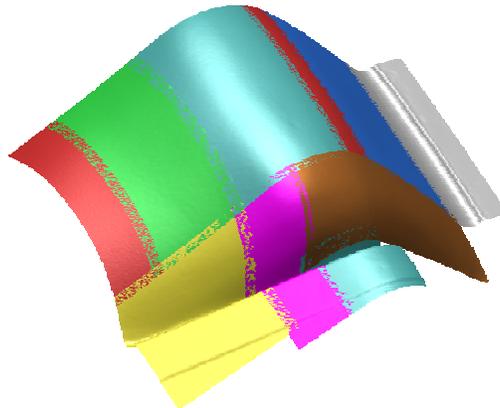
La captura de la nube de puntos va seguida del proceso de triangulación de cada una de las imágenes de rango. La triangulación es el primer acercamiento a la representación de la superficie del modelo digitalizado. La triangulación utilizada es Delaunay debido a las características de la superficie digitalizada donde no se presentan zonas oclusas, para tal caso este algoritmo de triangulación es aplicable [23] [5].

Ilustración 24. Digitalización de contacto – Máquina CNC –



La Ilustración 25 muestra el resultado de la triangulación de las imágenes de rango. El registro de la presente aplicación utilizó el sistema global de coordenadas de la mesa de medición de la maquina CNC para garantizar que los *range pictures* tienen una ubicación definida desde el sistema de digitalización y no debe ser modificados con el software de ingeniería inversa.

Ilustración 25. Triangulación y registro de las imágenes de rango



3.4.3 Procesamiento de geometría e integración del modelo CAD

En esta etapa se desarrolla la reconstrucción del objeto hasta lograr un modelo CAD que represente el modelo físico muestreado; luego se procede a aplicar herramientas CAM para la asistencia en procesos de fabricación y así preparar el modelo para su manufactura, donde se materializa el objeto modelado de superficies *NURBS*, el cual es modificable, tiene una aproximación realista del modelo y produce superficies suaves [4].

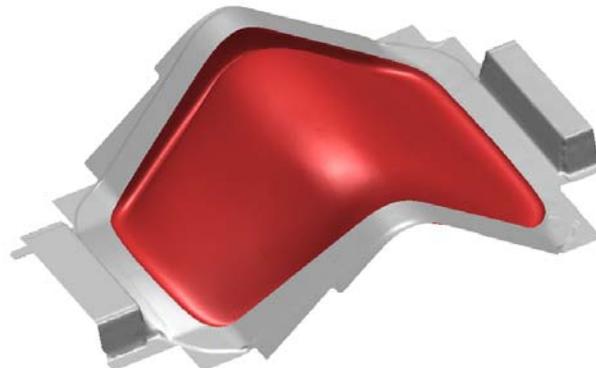
El primer acercamiento al proceso de reconstrucción de la superficies es el modelo de facetas triangulares, el cual es una malla poligonal que posee la información de la frontera del objeto. La representación poligonal es útil para aplicar procedimientos de prototipado rápido tales como estereolitografía, véase la *Ilustración 26. Malla poligonal.*

Ilustración 26. Malla poligonal



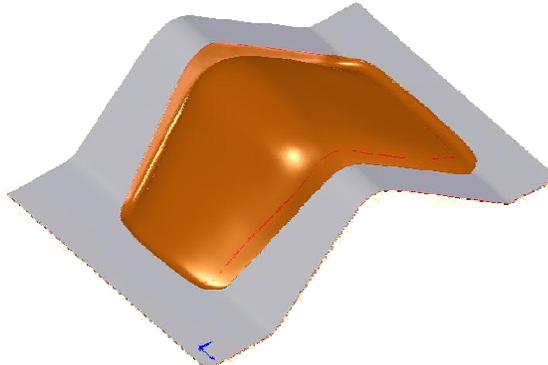
La malla del molde debe ser dividida en dos partes principales, una parte para la superficie de cierre y la otra para definir la cavidad del producto. El problema mas importante a resolver bajo esta perspectiva, es definir la curva fronteriza entre ambas zonas. La curva se calcula con la ayuda de rutinas que definen las curvas características del modelo de malla poligonal dispuestas por la herramienta CAD de reconstrucción. El resultado de las mallas poligonales separadas se puede observar en la *Ilustración 27.*

Ilustración 27. Malla poligonal de cierre y cavidad



La generación de la curva fronteriza es la base para crear la red de superficies *NURBS*. La superficie de cierre definida por la red de curvas es cubierta con un tendido de superficies *NURBS* que se ajustan a la nube de puntos del cierre. El mismo proceso se aplica a la cavidad del molde para obtener el modelo CAD de superficies *NURBS*, véase *Ilustración 28.*

Ilustración 28. Modelo CAD estándar exportado a modelador paramétrico 3D



El modelo CAD obtenido debe ser verificado y confrontado por medio de las herramientas de inspección y verificación del software utilizado para la reconstrucción del modelo CAD.

3.4.4 Mecanizado del molde

El modelo CAD se exporta al software de manufactura CAM para la programación de las rutinas de mecanizado de la máquina de control numérico que mecaniza y repara los defectos existentes en el molde.

3.5 MEDICINA: MODELOS 3D USANDO TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS

La aplicación en medicina exhibe la reconstrucción con ingeniería inversa de unas piernas humanas a partir de archivos DICOM, expone el proceso de generación de superficies del tejido óseo y cutáneo de unas piernas digitalizadas utilizando los datos extraídos por un tomógrafo axial computarizado.

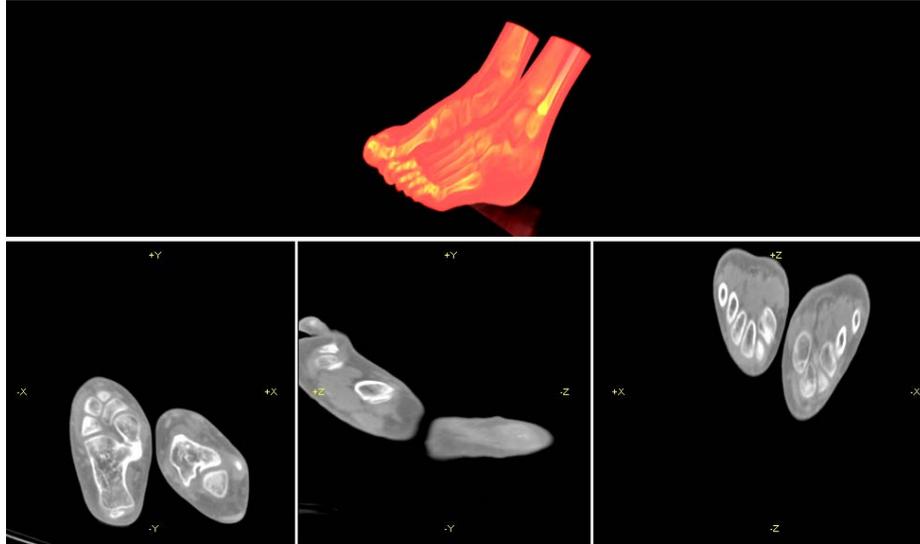
3.5.1 Definición del problema

Generar las superficies del tejido óseo y tejido cutáneo, a partir de archivos DICOM obtenidos con un digitalizador de tomografías axiales computarizadas. Los archivos con las tomografías tienen la información de un campo escalar, el cual fue extraído de la empresa PUBIMAGE, la cual provee el archivo VIX - CT64 el cual tiene la información del campo escalar de unas piernas humanas en un conjunto archivos de 33MB.

3.5.2 Adquisición de la información

La *Ilustración 29. Información tomografía computarizada miembros inferiores*, muestra en la parte superior la integración de las imágenes DICOM en una representación tridimensional. Esta es una representación tridimensional del campo escalar. La digitalización se obtiene con la integración de los cortes axiales (Vease imágenes parte inferior ilustración). Los cortes axiales del proceso de digitalización fueron realizados a una distancia de 1 mm entre planos, el campo escalar está compuesto por 512 x 512 x 250 voxels (Abreviatura en inglés de Volumetric Pixel), el tamaño de los voxel es de 0.4 mm x 0.4 mm x 1.0 mm. El campo escalar tiene valores numéricos reportados de 0 a 2717, son valores adimensionales directamente proporcionales con la densidad del tejido.

Ilustración 29. Información tomografía computarizada miembros inferiores

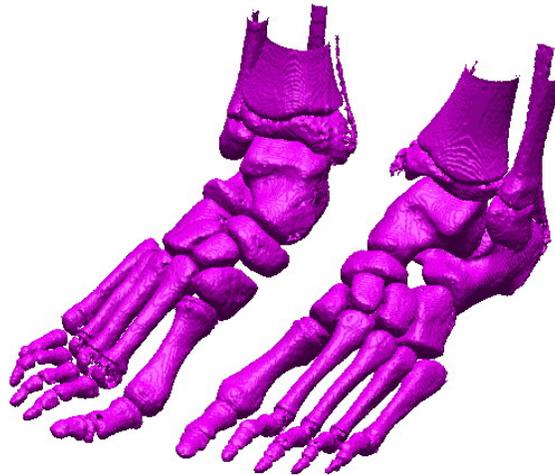


3.5.3 Procesamiento de la geometría

La geometría es procesada mediante el algoritmo Marching Cubes de extracción de isosuperficies a partir de campos escalares. Una Isosuperficie es un 2-Manifold en R^3 que tiene un valor escalar de umbral que segmenta la información geométrica de el campo escalar digitalizado [16].

La reconstrucción de la Isosuperficie asociada del tejido óseo requiere un valor de umbral entre 1800 y 2700. El resultado del información geométrica procesa se encuentra en la *Ilustración 30. Superficie malla poligonal tejido óseo.*

Ilustración 30. Superficie malla poligonal tejido óseo



La reconstrucción de la Isosuperficie asociada del tejido cutáneo requiere un valor de umbral entre 200 y 1000. El resultado del información geométrica reconstruida se encuentra en la *Ilustración 31. Superficie malla poligonal piel*.

Ilustración 31. Superficie malla poligonal piel



El modelo CAD integrado de las dos superficies de los tejidos se expone en *Ilustración 32. Integración modelo CAD*, con el resultado del proceso reconstructivo aplicado al campo escalar. Esta información puede utilizarse para interpretación medica, estudio de seres vivos con métodos no invasivos y en ingeniería biomédica en el desarrollo prótesis.

Ilustración 32. Integración modelo CAD



3.6 CONSERVACIÓN PATRIMONIO ARTISTICO E HISTORICO

La ingeniería inversa puede ser utilizada en aplicaciones artísticas donde se requiera la captura de información geométrica y adicionalmente la extracción de texturas de la superficie [17].

La aplicación artística enseña el proceso de digitalización de una máscara Teotihuacana que tiene superficies libres y posee una textura de colores producida por las pigmentaciones realizadas a la arcilla por indígenas mexicanos.

3.6.1 Definición del problema

Generar un modelo CAD con textura de una máscara Teotihuacana con un escáner laser 3D. El proceso debe incluir el registro de la información geométrica y la textura, el mejoramiento de los colores de la superficie y comprobación de resultado.

3.6.2 Adquisición de la geometría

El proceso de adquisición de geometría se logra por el uso de un escáner láser 3D que captura la geometría en imágenes de rango de mallas poligonales que almacena la nube de puntos, la topología de la malla y el texturizado. La *Ilustración 33. Imágenes de rango*, muestra las imágenes de rango obtenidas.

Ilustración 33. Imágenes de rango



3.6.1 Procesamiento de la geometría

Las imágenes de rango son registradas (véase *Ilustración 34. Registro de imágenes de rango*) y unidas (véase *Ilustración 35. Integración de imágenes de rango*).

El resultado obtenido tienen defectos como agujeros, caras erróneas y una frontera no delineada correctamente, luego de corregidos estos defectos el resultado se observa en *Ilustración 36. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con borde*.

Ilustración 34. Registro de imágenes de rango



Ilustración 35. Integración de imágenes de rango



Ilustración 36. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con borde



La textura se adjuntada automáticamente porque las imágenes de rango extraídas con el escáner laser incluyen esta información del objeto desde el proceso de digitalización, véase *Ilustración 37. Textura capturada por el escáner 3D.*

El problema radica ahora en que la textura no es extraída perfectamente desde el escaneado y la unión de las imágenes de rango genera defectos de compatibilidad

en la textura de las zonas compartidas, esto se muestra en la *Ilustración 38. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold Textura capturada con escáner 3D.*

Ilustración 37. Textura capturada por el escáner 3D



Ilustración 38. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold Textura capturada con escáner 3D



El proceso de mejoramiento de la textura implica utilizar herramientas de tratamiento de imágenes en 3D, las cuales afinan los colores, contraste y brillo para alcanzar una optimización de la apariencia del objeto artístico expuesto en la *Ilustración 39. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con Textura mejorada a partir de herramientas computacionales y la Ilustración 40. Comparativo textura capturada escáner laser 3D y textura procesada con software de ingeniería inversa.*

Ilustración 39. Modelo de malla poligonal 2 - Manifold con Textura mejorada a partir de herramientas computacionales



Ilustración 40. Comparativo textura capturada escáner laser 3D y textura procesada con software de ingeniería inversa.



4 CONCLUSIONES

1. La ingeniería inversa es una metodología de base tecnológica que permite generar un modelo CAD integrado con superficies libres. El modelo CAD puede ser utilizado en procesos de ingeniería que implican manufactura, diseño y análisis haciendo uso de herramientas CAD/CAM/CAE.
2. Un proyecto de ingeniería inversa implica la configuración de herramientas de digitalización para la captura de la información y herramientas CAD para la reconstrucción de superficies.
3. Las herramientas de digitalización para un proyecto deben ser seleccionadas de acuerdo a los siguientes elementos: Tipo aplicación, Propiedades del objeto, Características de la superficie, Velocidad de captura requerida, Precisión y Herramientas disponibles para el preprocesamiento y reconstrucción de superficies.
4. Las herramientas CAD para el preprocesamiento y reconstrucción de superficies deben ser seleccionadas de acuerdo a los siguientes elementos: Tipo de información digitalizada, Volumen de información a procesar, Formato de resultados requerido y Aplicación del modelo CAD en procesos de diseño, manufactura y análisis.
5. La presente monografía expone aplicaciones industriales recopiladas durante 7 años donde se describen algunas experiencias académicas e industriales. Estas experiencias implican áreas tales como: Procesamiento de geometrías libres, prototipado rápido, Diseño mecánico, Desarrollo de producto, Verificación dimensional, Reparación de moldes, Artes y Medicina.

5 AGRADECIMENTOS

El autor ofrece sus más sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones que han colaborado al desarrollo del proyecto documentado en la presente monografía:

- Asesor de proyecto Francisco Botero, profesor de la Universidad EAFIT por acompañamiento y aportes.
- Grupo de estudio e interés en manufactura avanzada – GEIMA de la Universidad EAFIT, especialmente a los coordinadores Carlos Rodríguez y Carlos Mario Echeverri por su acompañamiento técnico e investigativo, y la oportunidad de participar en proyectos de ingeniería inversa aplicada.
- Laboratorio de CAD/CAM/CAE de la Universidad EAFIT. Especialmente al Dr. Oscar Ruiz quien brindó formación técnica e investigativa en las técnicas de ingeniería inversa mediante el desarrollo de proyectos de investigación.
- El Laboratorio Advance Man Machine Interface Laboratory de la Universidad de Alberta (Canadá), especialmente al Dr. Pierre Boulanger por su gran aporte en las fases iniciales de aplicación y conocimiento del proceso de ingeniería inversa aportando apoyo técnico y recursos para la aplicación industrial.
- Laboratorio de inteligencia artificial de la universidad Nacional de Medellín, especialmente a los profesores John William Branch y Albeiro Espinosa por la posibilidad de desarrollar algunas aplicaciones conjuntas en proyectos investigativos.
- La empresa DYNACAD LTDA, especialmente Ing. Luisa Fernanda Hoyos por su apoyo en el desarrollo de las aplicaciones y sus críticas constructivas en la presente monografía.
- La empresa Servicios Industriales OCG E.U. en especial a la Ing. Catherine Cifuentes

6 GLOSARIO

CAD: Diseño Asistido por computador.

CAE: Ingeniería asistida por computador.

CAM: Manufactura asistida por computador.

CNC: Control numérico computarizado.

CURVA PARAMETRICA: Sea x, y, z función del parámetro u , continuamos en un Dominio D de u . se llama Curva Paramétrica al conjunto de puntos (x, y, z) dados por $r(u) = x(u)i + y(u)j + z(u)k$ Las Ecuaciones $x=(u)$, $y=(u)$ y $z=(u)$ se llaman Ecuaciones Paramétricas de la curva.

DIGITALIZACIÓN: Es el proceso de convertir la información geométrica de un objeto real en tres dimensiones en formato digital.

ESCÁNER 3D: Dispositivo de digitalización que toma la información del objeto por medio de un sistema de no contacto (óptico ó láser).

IMÁGENES DE RANGO: subconjunto de datos geométricos resultado del proceso de digitalización a una superficie, donde se captura parcialmente una zona de la superficie. La unión de los subconjuntos genera el muestreo total de la superficie digitalizada.

MALLA 2-MANIFOLD: Malla cuya topología local en todos sus elementos es homeomorfo con un disco.

MALLA POLIGONAL: Superficie creada mediante un método tridimensional generado por sistemas de vértices posicionados en un espacio virtual con datos de coordenadas propios.

NUBE DE PUNTOS: Conjunto de puntos de muestreo de una superficie digitalizada, almacenadas en coordenadas X, Y, Z .

NURBS: (Non uniform rational B-Spline) modelo para la representación de curvas y superficies libres en modeladores CAD.

SUPERFICIE PARAMETRICA: Sea x, y, z función de u y v , continuamos en un Dominio D del plano uv . se llama Superficie Paramétrica al conjunto de puntos (x, y, z) dados por $r(u, v) = x(u, v)i + y(u, v)j + z(u, v)k$ Las Ecuaciones $x=(u, v)$, $y=(u, v)$ y $z=(u, v)$ se llaman Ecuaciones Paramétricas de la superficie.

TAC: Tomografía axial computarizada. Utiliza rayos X con un sistema informático que procesa las imágenes para diagnosticos medicos.

TEXTURA: Propiedad que tienen las superficies externas de los objetos. En el caso de ingeniería inversa las texturas asocian colores, pigmentaciones cosméticas y efectos táctiles a las superficies.

TOPOLOGIA: Rama de las matemáticas dedicada al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas. En ingeniería inversa la topología describe la conectividad de un elemento con su vecindad inmediata.

TRIANGULACIÓN: Proceso en el cual un conjunto de puntos es conectado con una malla poligonal de triángulos. Los triángulos muestran la conectividad (Topología) existente entre los puntos ubicados en el espacio 3D. El algoritmo Delaunay es utilizado para triangular nubes de puntos.

VOXEL: Denominación para pixel volumetrico (En ingles Volumetric Voxel).

7 BIBLIOGRAFÍA

1. ATOS. <http://www.gom.com>
2. 3D Scanners. <http://www.3dscanners.com>
3. Bidanda B, Narayanan V y Billo R. Reverse Engineering and Rapid Prototyping. Handbook of Design, Manufacturing and Automation. R.C. Dorf and A. Kusiak, John Wiley & Sons.
4. Boulanger, Pierre. Collaborative Virtual Manufacturing from the Ground Up. 2005
5. Carvalho, Fernandes, Santos and Custódio. Integrated product and tooling development via reverse engineering methodologies and rapid prototyping techniques. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto. Florianópolis, SC - 25-27, 2001.
6. Moldes México. <http://www.metalmexico.com>.
7. P. Besl and N. McKay. A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 14(2):239–256, Feb. 1992.
8. Roland. <http://www.rolanddga.com>
9. Sanz A, Felix y Blanco F, Julio. CAD–CAM. Gráficos, animación y simulación por computador. Thomson. 2002.
10. Tutorial RapidForm™ XOR, INUS Technology, Inc.
11. Wohlers T. Rapid Prototyping and Tooling, State of the Industry. Worldwide Progress Report. 1999.
12. T. A. Grimm & Associates, Inc. & Z Corporation. 3D Scanners. Selection criteria for common applications. [pdf] 2006.
13. Sanz A, Felix y Blanco F, Julio. CAD–CAM. Gráficos, animación y simulación por computador. s.l. : Thomson, 2002.
14. Flórez, Sebastian y Gallego, Luis Alberto. *Curso virtual interactivo de ingeniería inversa utilizando digitalización por contacto en máquinas CNC, Cap. 1*. Ing. Producción, Universidad EAFIT. Medellín : s.n., 2004. Proyecto de grado.
15. H. R. Brahana. Systems of circuits on two-dimensional manifolds. Ann. Math.23 (1922), 144.
16. W.Lorensen, H.Cline. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm Computer Graphics, 21 (4): 163-169, July 1987.
17. J. Llamas, P. Martín. Aplicación de tecnologías de digitalización 3D + Color a una iglesia Romantica. Laboratorio de visión artificial – Centro tecnologico CARTIF. Valladolid, España.
18. Bell, W. H. Modern practice in orthognatic and reconstructive surgery. W.B. Saunders company. Philadelphia. 1992.

19. De Vleeschouwer. The Usage of medical image for creating Custom FE and CFD Models. Proceedings of 1st International Conference on additive Manufacturing. DAAAM International. 2007.
20. Bajaj. C, Bernardini. F, Guoliang. X. Automatic Reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans. Department of computer sciences. Purdue University.
21. KANTZ. J. Application of sweeping techniques to reverse engineering. Master in computer and information science. University of Michigan. 2003.
22. St Germain. H James. Reverse engineering utilizing domain specific knowledge. PhD thesis in computer science. University of Utah. 2002.
23. B. Delaunay: Sur la sphere vide. A la mémoire de Georges Voronoi. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk (Bulletin of Academy of Sciences of the USSR), 7, págs. 793-800, 1934.

8 NORMAS TECNICAS

1. ICONTEC. NTC 4303. *Pie de rey. Requisitos y ensayos.* 1997.
2. —. NTC 1724. *Metrología. Cintas métricas comerciales.* 1987.
3. —. NTC 4219. *Comparadores de carátula de precisión con indicación mecánica.* 1997.
4. —. NTC 4513. *Comparadores de carátula.* 1998.
5. —. NTC 4495. *Conceptos, requisitos y ensayos de micrómetros incorporables y micrómetros de profundidad.* 1998.
6. —. NTC 4352. *Micrómetros para mediciones exteriores, construcción normal. Conceptos, requisitos y ensayos.* 1997.
7. —. NTC 4054. *Metrología. Metrología en la empresa. Constancia de comprobación de los medios de medición.* 1996.
8. —. NTC 4055. *Metrología en la empresa. Modalidades prácticas para la elaboración de procedimientos de calibración y comprobación de los medios de medición.* 1996.
9. —. NTC 4056. *Metrología. Metrología en la empresa. Ensayos. Enlace de los resultados de medida a los patrones.* 1996.
10. —. NTC 4057. *Metrología. Lineamientos para determinación de intervalos de recalibración de equipo de medición usado en laboratorio de ensayo.* 1996.
11. —. NTC 4288. *Metrología. Función metrológica en la empresa.* 1997.
12. —. NTC 2062-1. *Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 1: Términos estadísticos generales y términos utilizados en el cálculo de probabilidades.* 2008.
13. —. NTC 2062-2. *Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 2: Control estadístico de la calidad.* 1998.
14. —. NTC 2062-3. *Estadística. Parte 3: Diseño de experimentos.* 2002.
15. —. NTC 2224. *Control de calidad estadística. Interpretación estadística de resultados de ensayos. Estimación de la media - intervalo de confianza.* 1986.
16. —. NTC 3540. *Normas Fundamentales. Interpretación estadística de datos. Técnicas de estimación y pruebas relacionadas con las medias y las varianzas.* 2008.
17. —. NTC 4477. *Interpretación estadística de datos. Determinación de un intervalo de tolerancia estadística.* 2008.
18. —. NTC 3529-1. *Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y resultados de las mediciones. Parte 1: Principios generales y definiciones.* 2003.
19. —. NTC 3529-2. *Exactitud (veracidad y precisión) de métodos de medición y resultados. Parte 2: Método básico para la determinación de repetibilidad y reproducibilidad de un método normalizado de medición.* 2003.
20. —. NTC 3529-3. *Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y resultados de las mediciones. Parte 3: Mediciones intermedias de la precisión de un método normalizado de medición.* 2003.
21. —. NTC 3529-4. *Exactitud (veracidad y precisión) de los métodos y resultados de las mediciones. Parte 4: Métodos básicos para la determinación de la veracidad de un método de medición normalizado.* 2007.
22. —. NTC 3529-5. *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 5: Métodos alternativos para la determinación de la precisión de un método normalizado.* 2007.
23. —. *compendio "sistema de gestión de la seguridad de la información (SGSI)".* 2006. Vols. NTC-ISO/IEC 27001, NTC-ISO-IEC 17799, NTC- 5411-1.