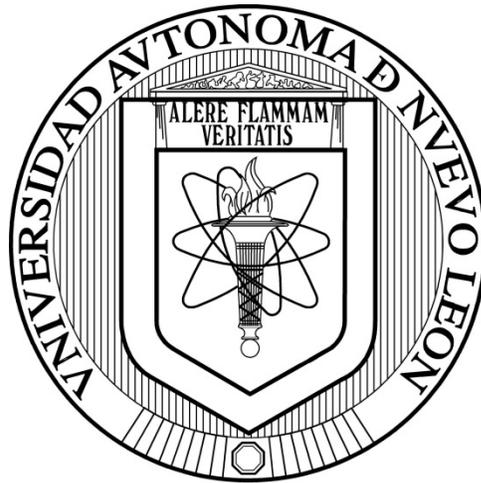


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REDISEÑO Y RECONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE
ROLOFORMADO DE COMPONENTES ESTRUCTURALES
AUTOMOTRICES**

POR

OMAR EDUARDO LÓPEZ BOTELLO

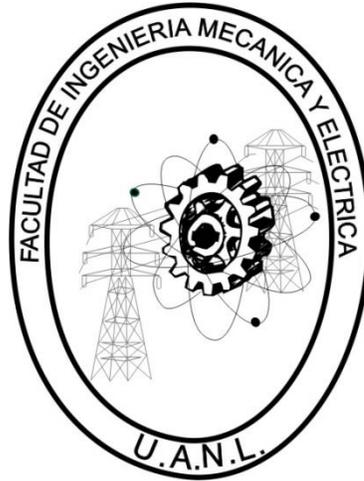
TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REDISEÑO Y RECONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE
ROLOFORMADO DE COMPONENTES ESTRUCTURALES
AUTOMOTRICES**

POR

OMAR EDUARDO LÓPEZ BOTELLO

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Rediseño y Reconfiguración de un Sistema de Roloformado de Componentes Estructurales Automotrices”** realizada por el Ing. Omar Eduardo López Botello sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor

Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo

Coasesor

Dra. Adriana Salas Zamarripa

Coasesor

Dr. Héctor R. Siller Carrillo

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

San Nicolás de los Garza, N.L., Octubre del 2011

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida y así mismo por darme las herramientas y las oportunidades necesarias para culminar este proyecto.

A mi futura esposa, Mónica, quien me ha mostrado nuevos horizontes, me ha enseñado a ser mejor persona y siempre ha estado conmigo en buenos y malos momentos.

A mi familia que me ha permitido crecer y me ha enseñado a tomar las oportunidades que la vida me presenta.

Al grupo de trabajo el cual pertenezco ya que sin ellos el trabajo diario no sería posible y que con sus experiencias y sus conocimientos me han mostrado el verdadero valor de un equipo de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y por el financiamiento de este proyecto, ya que mediante este tipo de apoyos permite acrecentar el nivel de educación e investigación y desarrollo nacional. A Metalsa por su colaboración y su disponibilidad en cuanto a los requerimientos que el proyecto ameritaba.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y particularmente a su Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por facilitar tanto sus instalaciones como sus equipos durante este proyecto.

A la Dra. Patricia Zambrano por ser una gran asesora y porque en todo momento he recibido su apoyo y la motivación necesaria para lograr culminar este proyecto. También por ser un gran ejemplo y por mostrarme que el trabajo es el camino del éxito, pero sobre todo por ser una gran amiga.

A todo el grupo de trabajo al cual pertenezco ya que sin su apoyo, sus conocimientos y su entrega al trabajo diario, esto no hubiera sido posible.

A mi futura esposa, Mónica, quien me ha tenido paciencia durante este largo periodo, quien me ha ayudado a encontrar soluciones cuando lo he requerido y por su infinita ayuda cuando más la necesito.

Y finalmente a todas aquellas personas quienes con su granito de arena han ayudado a la realización de este trabajo.

ÍNDICE

Resumen	
1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	3
1.4 Hipótesis	5
1.5 Límites de Estudio	5
1.6 Metodología	6
2. Ingeniería Inversa	8
2.1 Introducción	8
2.2 Ingeniería Inversa	9
2.3 Perspectiva Histórica de la Ingeniería Inversa	10
2.4 Proceso de la Ingeniería Inversa	14
2.5 Digitalización	15
2.6 Procesamiento de Puntos	20
2.7 Modelado Geométrico dependiendo de la Aplicación	21
3. Ingeniería Inversa y Modelado del Sistema	22
3.1 Introducción	22
3.2 Digitalización de los Castillos de Roloformado	23
3.3 Ingeniería Inversa de los Datos adquiridos desde el Digitalizador	38
3.4 Modelado en CAD del Sistema	40
4. Caracterización de Materiales	45
4.1 Introducción	45
4.2 Definición de las Piezas a caracterizar y de la Técnica a utilizar	46
4.3 Caracterización de cada una de las Piezas	47
5. Selección de Materiales	59
5.1 Introducción	59
5.2 Estrategia de Selección	60
5.3 Metodología para la Selección de Materiales a utilizar	63
6. Discusión	75
6.1 Introducción	75
6.2 Digitalización	76
6.3 Ingeniería Inversa	77
6.4 Caracterización de Materiales	78
6.5 Selección de Materiales	79
7. Conclusiones y Trabajo a Futuro	88
7.1 Conclusiones	88
7.2 Trabajo a Futuro	90
Referencias	91
Listado de Tablas	96
Listado de Figuras	97

RESUMEN

Los sistemas de roloformado cuentan con partes críticas para el establecimiento del precio del producto final. En el presente trabajo se utilizan diversas disciplinas para realizar el rediseño y reconfiguración de un sistema de roloformado. Las herramientas a utilizar fueron la ingeniería inversa, caracterización de materiales y selección de materiales. Mediante la ingeniería inversa fue posible realizar el rediseño del sistema en base a los datos adquiridos desde un digitalizador 3D y el posterior procesamiento de los datos adquiridos a partir del mismo. Fue indispensable también la correspondiente caracterización de materiales de los componentes que conforman el sistema actual, esto con la finalidad de conocer el tipo de materiales que fueron utilizados para la construcción de las torres del sistema de roloformado al igual que sus características principales. Al contar con el rediseño de las torres y las especificaciones que reúnen todos los materiales que las conforman, fue posible obtener las restricciones necesarias para lograr la realización de una correcta selección de materiales. A lo largo del presente trabajo se desarrollan y se discuten cada una de estas disciplinas las cuales, en conjunto, permiten el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

El objetivo principal de esta tesis es rediseñar y reconfigurar un sistema de roloformado que agregue valor al procesamiento en metales. Durante este capítulo se describen las justificaciones, las limitantes del estudio y la metodología desarrollada durante este proyecto para llevarlo a cabo y cumplir cada uno de los objetivos planteados en este capítulo.

1.2 Justificación

El proceso de roloformado es una operación de dobleces continuos en los cuales una lámina larga de metal es pasada a lo largo de un conjunto de rodillos consecutivos, cada uno realizando solo una parte incremental del dobléz total, esto es hasta que se obtenga el perfil

deseado [1-2]. Este proceso es ideal para producir partes con longitudes muy grandes o de producción masiva.

Actualmente, la tecnología y desarrollo de estos sistemas es extranjera. El sistema de roloformado estudiado en este proyecto es de origen europeo, lo cual eleva el costo de la producción debido a que actualmente el mantenimiento de este sistema es realizado por técnicos extranjeros y no por personal de la empresa. El diseño y construcción de nuevos sistemas de roloformado flexibles con nuevas tecnologías desarrolladas en el país repercutiría en grandes beneficios para las empresas nacionales que utilizan este tipo de sistemas, además de contribuir al conocimiento dentro de este ramo [3].

El rediseño o actualización de cualquier producto se puede lograr gracias a nuevas tecnologías existentes, como lo es la ingeniería inversa. La ingeniería inversa se define como el proceso de obtener un modelo geométrico por medio del diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) desde puntos tridimensionales adquiridos digitalmente de los productos o partes existentes [4]. La ingeniería inversa es una disciplina que evoluciona rápidamente y cubre una gran variedad de actividades, por ejemplo, en la industria para la verificación de productos [5-7], en la medicina [8-10] y en otro tipo de aplicaciones como la paleontología [11] y la arqueología [12].

Gracias a la ingeniería inversa y a nuevos equipos de digitalización 3D mediante métodos de gran precisión [13] y que no implican contacto con la pieza, se pueden obtener datos "in situ" del sistema e inclusive realizar mediciones de él en tan solo unos pocos segundos [14-16].

Por último para lograr el rediseño y la reconfiguración total de este sistema es muy importante conocer los materiales que deben utilizarse para su fabricación, por lo cual se realizó en medida de lo posible la caracterización de éstos y un análisis de las funciones de cada una de

las partes para poder determinar una óptima selección de estos materiales. El desarrollo de esta tecnología permitirá que el 95% del producto sea elaborado en el país, y que solo el 5% de las piezas fueran de línea y serían traídas desde el extranjero debido al gran impacto de estas dentro del sistema. Es muy importante considerar que los materiales a seleccionar deben de ser materiales que se puedan obtener con proveedores nacionales y que sean de entrega rápida, reduciendo así el costo final del producto

1.3 Objetivos

Objetivo General

- Rediseñar y reconfigurar un sistema de roloformado basado en la selección de materiales óptima para reducir los costos de fabricación y mantenimiento e incrementar la calidad del sistema, así como sus propiedades mecánicas del sistema de roloformado, generando así conocimientos referentes al diseño y fabricación de estos sistemas.

Objetivos Particulares

- Obtención de la digitalización del sistema de roloformado actual para obtener características macroscópicas del sistema.
- Realizar la ingeniería inversa del sistema de roloformado con miras a obtener los principios tecnológicos de dicho sistema y mejorarlos.
- Realizar la caracterización de los materiales actualmente utilizados en el sistema de roloformado.

- Analizar los resultados obtenidos durante fases anteriores y realizar una selección de materiales para la fabricación de un nuevo prototipo.

A continuación en la figura 1.1 se presenta un mapa conceptual de los objetivos del presente trabajo.



Figura 1.1 Objetivos del presente trabajo.

1.4 Hipótesis

De acuerdo a la información obtenida por la empresa con la cual se trabajó para la realización del presente trabajo, los costos de fabricación y mantenimiento del sistema de roloformado son elevados afectando el precio del producto final. Algunos investigadores proponen métodos eficientes para la selección de materiales en base a diferentes objetivos que permiten una selección óptima [17-18]. El rediseño y la reconfiguración del sistema de roloformado se fundamentarán en un correcto análisis de los resultados de la caracterización de los materiales, la digitalización del sistema, ingeniería inversa, el uso de un algoritmo de selección de materiales y la ayuda de herramientas computacionales [19].

1.5 Límites de Estudio

La construcción de las torres que soportan el sistema de roloformado es el proceso más crítico en la fabricación del sistema e impacta de forma considerable el precio final del producto, esto de acuerdo a estudios realizados internamente por la empresa. Al lograr una optimización mecánica y una adecuada selección de los materiales para así cumplir con los objetivos planteados es posible disminuir el precio del producto final. Debido a esto el presente trabajo se centra solamente en la construcción de un prototipo de las torres del sistema, esto significa que quedan excluidos todos los demás elementos que forman parte del proceso de roloformado.

1.6 Metodología

Para el rediseño y la reconfiguración del sistema de roloformado se tiene como base un sistema que se encuentra actualmente funcionando en línea, por lo que el primer paso para la realización de este trabajo fue la digitalización tridimensional de las torres de roloformado para comenzar con este proceso. Después de la digitalización de las torres de roloformado, el proceso de ingeniería inversa fue realizado, modelando así el sistema completo en CAD.

Una vez que se contó con cada una de las partes diseñadas, se comenzó con el ensamble del modelo tridimensional, esto con el fin de identificar interferencias existentes al ensamblar los componentes y con esto asegurar que por cuestiones de diseño las tolerancias del sistema se encuentren bien definidas.

El siguiente paso fue identificar los materiales de cada una de las partes del sistema, para esto se tomaron pequeñas muestras de algunas de las partes y se realizó la caracterización de ellas, esto con la finalidad de determinar las propiedades de los materiales que conforman el sistema y así poder seleccionar materiales alternos a los mismos. En las partes restantes, debido a la limitante del sistema de estar en línea de producción solo fue posible obtener fichas técnicas de los materiales utilizados y valores de dureza de algunos de ellos.

En base a lo anterior, se propuso una selección del tipo de material a utilizar en colaboración con el fabricante, logrando así la elección de materiales más económicos y que tengan propiedades muy similares o inclusive mejores que las actuales, manteniendo así el objetivo de reducir costos.

Actualmente, el primer prototipo de la torre de roloformado fue fabricado gracias a los resultados obtenidos durante esta investigación. La torre fue remplazada en el sistema de producción, donde la empresa ha estado realizando un monitoreo y análisis estadístico de su

funcionamiento y fallas más recurrentes con la finalidad de garantizar su óptimo funcionamiento.

En la figura 1.2 se muestra un esquema con la metodología descrita anteriormente.

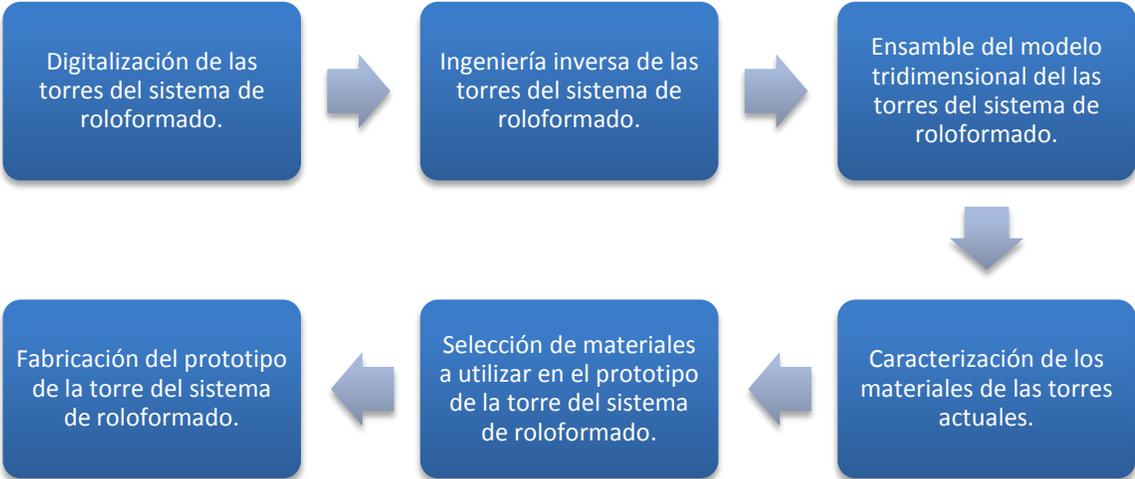


Figura 1.2. Esquema de la metodología del trabajo.

Capítulo 2

Ingeniería Inversa

2.1 Introducción

Debido a la competitividad en la que se encuentran las empresas actualmente, se han visto obligadas a cada día producir productos más competitivos que otros proveedores, una de las herramientas más utilizadas para lograr esto es la ingeniería inversa. En nuestro país durante los últimos años se ha buscado generar nuevas tecnologías a partir de tecnologías ya desarrolladas en otros países, claro recalcando que no se pretende copiar dicha tecnología, si no tomar los conceptos de ella y mejorarlos, y todo esto se logra a través de disciplinas como la ingeniería inversa.

Al hablar de ingeniería inversa, implícitamente se habla de digitalizadores, ya que sin estos no sería posible que haya evolucionado tan rápidamente. Esto es gracias a las nuevas tecnologías que encontramos día a día para la digitalización de productos.

Las principales aplicaciones se encuentran en la industria, como apoyo al diseño y posterior cálculo y control dimensional de aquellas formas complejas que no pueden ser descritas con fórmulas matemáticas sencillas, y que requieren del apoyo de un modelo físico, como por ejemplo, en la industria automotriz. También en aplicaciones médicas, artísticas, entre otras.

2.2 Ingeniería Inversa

La ingeniería es el proceso de diseñar, manufacturar, ensamblar y mantener productos y servicios. En la actualidad existen dos tipos de ingeniería, la ingeniería directa y la ingeniería inversa. [4]

La ingeniería inversa es una disciplina que evoluciona rápidamente y que cubre una gran variedad de actividades. La ingeniería directa es el proceso tradicional conocido, en el cuál se parte de un modelo conceptual y lógico hacía un producto físico. En cambio la ingeniería inversa es el proceso de reconstrucción, de forma informática, de una pieza sin necesidad de documentación, partiendo de un modelo físico (modelos de diseño, industriales, artísticas, prototipos, etc.) para obtener el modelo CAD y del diseño conceptual del objeto en cuestión.

Al proceso de capturar digitalmente entidades físicas de un componente, se refiere a Ingeniería Inversa, concepto el cuál es definido por investigadores con respecto a sus tareas específicas [20]. Abbela y coautores describen a la ingeniería inversa como: el concepto básico de producir una parte basada en un modelo original o físico sin la necesidad de un dibujo de la ingeniería [21]. A su vez, Yau y coautores definen a la ingeniería inversa, como el proceso de recabar nuevas geometrías de una parte manufacturada digitalizando y modificando un modelo CAD existente [22].

Existen diversas áreas de aplicación de la ingeniería inversa. Generalmente es necesaria para reproducir una parte, cuando no se cuentan con los dibujos originales o la documentación necesaria. En otros casos se podría requerir del rediseño de una parte existente, esto cuando los análisis y las modificaciones son necesarias para construir un producto nuevo y mejorado. En las áreas de diseño estético es particularmente importante en industrias como la automotriz, se requieren de prototipos porque los diseñadores confían más en evaluar objetos tridimensionales que proyecciones de los objetos en una pantalla 2D a una escala reducida. Otra área de aplicación sumamente importante es la generación de formas que se adaptan fácilmente a superficies del cuerpo humano, como lo son los cascos [23], prótesis [24] e inclusive en la industria aeroespacial [25]. Pero las aplicaciones de la ingeniería inversa no terminan aquí, trabajos recientes por investigadores de otras disciplinas utilizan la ingeniería inversa para restaurar construcciones arqueológicas del mundo [12], e inclusive para realizar distintos tipos de estudios a grandes seres que habitaron nuestro planeta hace millones de años [11].

2.3 Perspectiva Histórica de la Ingeniería Inversa

La ingeniería inversa está directamente ligada con los avances en el campo de la metrología. Como consecuencia de la mejora en la producción mediante el desarrollo de la máquina-herramienta, se hizo necesario un aumento en la exigencia de la calidad del producto, lo que conllevaba a la necesidad del desarrollo de nuevas técnicas, para poder medir con precisión las piezas fabricadas. En 1805, Maudslay construyó un micrómetro de tornillo y, posteriormente alrededor de 1840, Joseph Whitworth desarrolló una máquina para medir con elevada precisión. Finalmente, fue en 1875 cuando Brown & Sharpe concibe lo que sería la primera máquina de medir por coordenadas, para una compañía fabricante de barcos y yates de competencia.

Como primera solución a la reconstrucción 3D, aparecieron las máquinas copiadoras, pantógrafos adaptados al proceso de mecanizado. Constan de dos cabezales, uno recorriendo la sección *master* y el otro con un cabezal fresado que seguía la geometría a construir. Un paso importante se dio mediante la separación en dos fases de la digitalización (modelo virtual 3D) y mecanización, automatizándose ambos procesos mediante CNC. Las actuales técnicas de digitalizado 3D permiten capturar los puntos de medida con mayor precisión y velocidad, pudiéndose clasificar en dos grupos: sistemas por y sin contacto con el objeto a digitalizar. Mediante los sistemas por contacto se obtienen las coordenadas de los puntos, gracias al desplazamiento continuo de una punta sobre la superficie, y son adaptables a máquinas tridimensionales empleadas para control dimensional (*ver figura 2.1*). Dentro de los sistemas sin contacto, se encuentra una variedad de opciones: sistemas por láser (*Figura 2.2 a*); sistemas de visión activa mediante emisión y recepción de luz, que permite calcular profundidades, y sistemas de proyección de luz blanca y receptor de una cámara con sensor de dispositivo de acoplamiento de carga (CCD por sus siglas en inglés) (*Figura 2.2 b*). La siguiente fase en el proceso de ingeniería inversa, es la reconstrucción de las superficies matemáticas que se apoyan en las nubes de puntos obtenidas en la digitalización, a través de un software CAD para obtener el modelo 3D virtual [26].



Figura 2.1 Máquina de Medición por Coordenadas (Tomada de www.brownandsharpe.com)

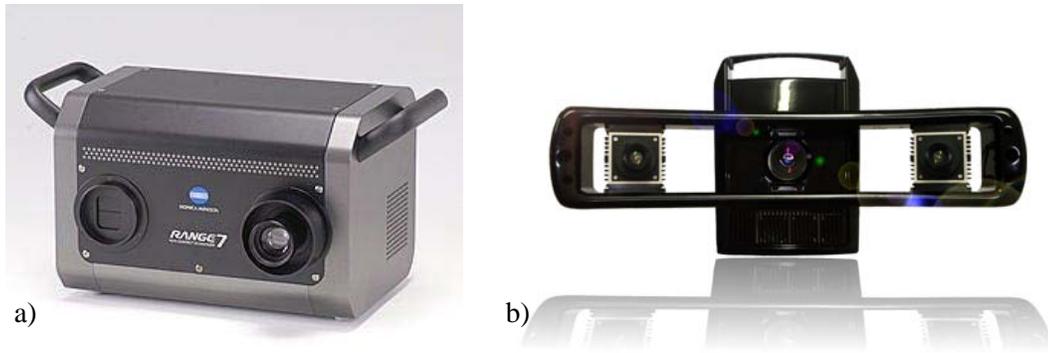


Figura 2.2 a) Konica Minolta Range 7 (Tomada de www.konicaminolta.com.mx), b) SPATIUM FMM 3D Scanner (Tomada de wwwspatium3d.com).

En la figura 2.3 se puede apreciar una perspectiva histórica de cómo la velocidad de adquisición de datos ha ido evolucionando a lo largo de los años, y es claro el impacto que esta evolución ha tenido sobre la ingeniería inversa.

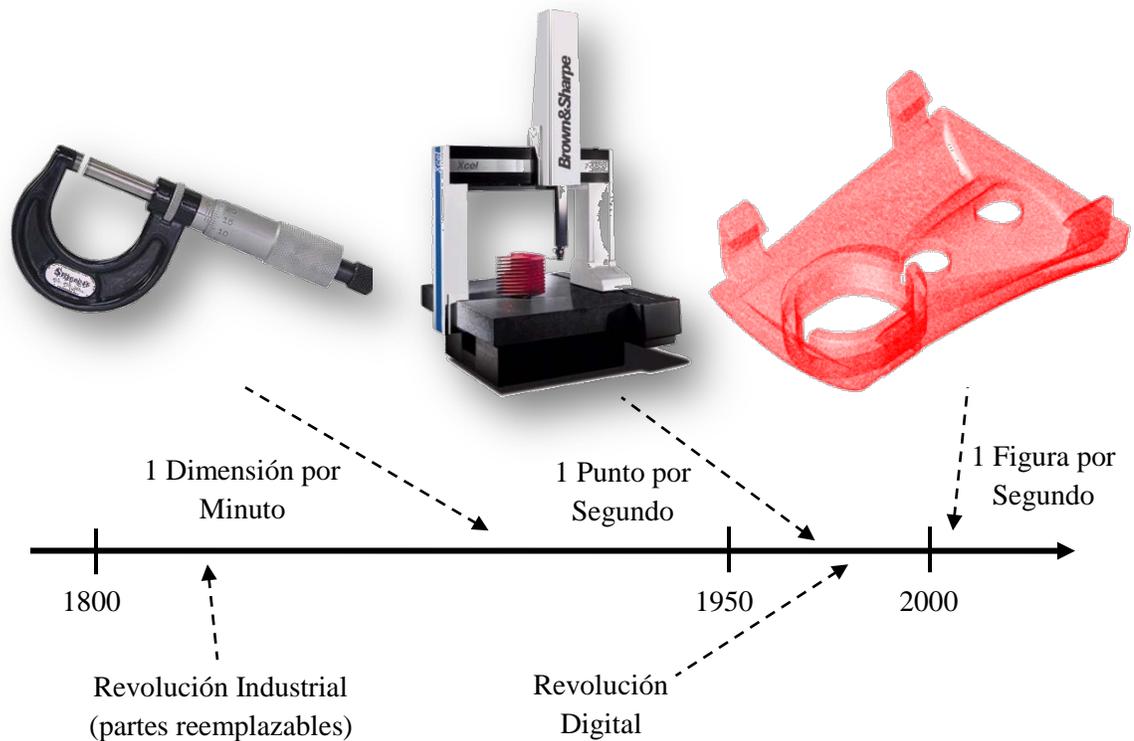


Figura 2.3 Progreso de la Medición Dimensional.

La evolución de la ingeniería inversa en los próximos años parece estar dirigida hacia la mejora de las técnicas, tanto de filtrado y postproceso de los puntos obtenidos en la digitalización, como de las herramientas de reconstrucción geométrica a partir de los mismos, de forma que en un futuro, la reconstrucción de un objeto sea un proceso menos costoso en tiempo y dinero, y con ello la ingeniería inversa se convierta en algo frecuente y económico. Un claro ejemplo de ellos son los nuevos equipos basados en rayos x con los cuales se puede inclusive digitalizar las operaciones internas de una pieza (ver figura 2.4).

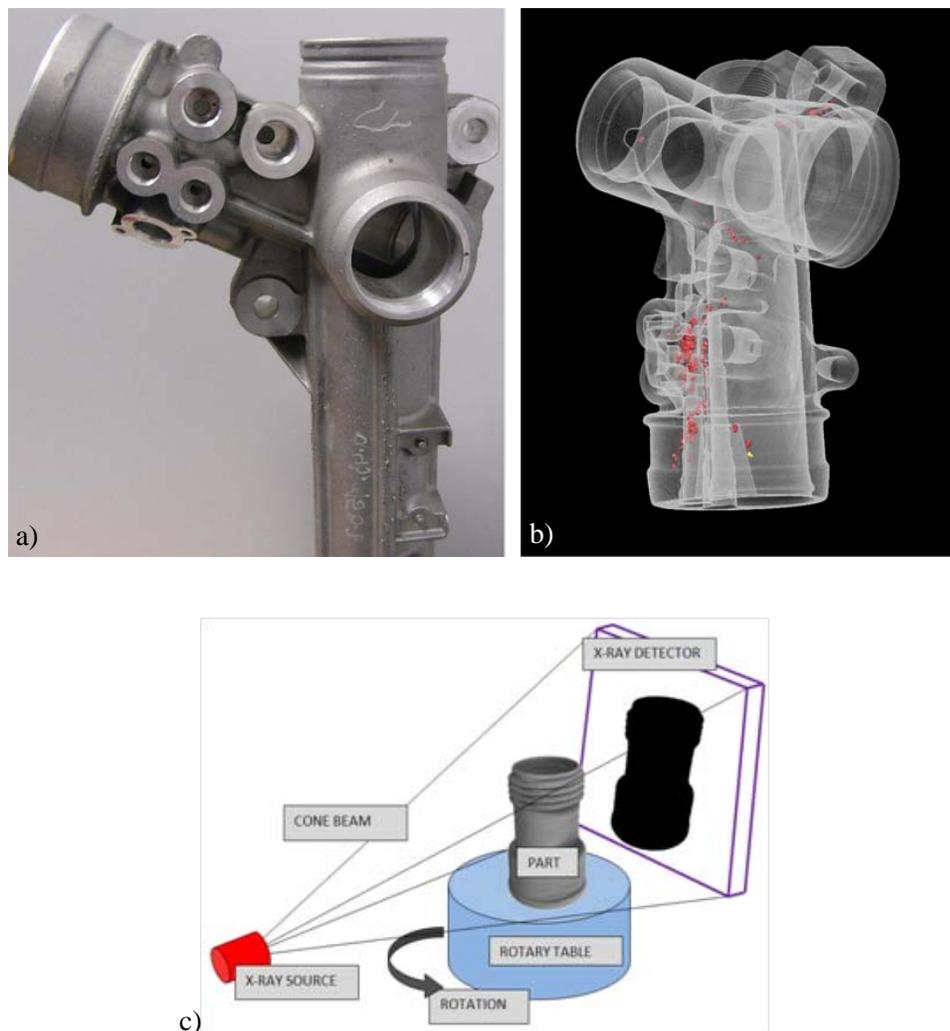


Figura 2.4 a) Pieza a digitalizar, b) Nube de puntos de la pieza, c) Principio de funcionamiento de la técnica llamada tomografía computacional.

2.4 Proceso de la Ingeniería Inversa

El proceso natural de la ingeniería inversa consta de 3 pasos principales:

- Digitalización de la pieza.
- Procesado de los puntos obtenidos.
- Modelado geométrico dependiendo de la aplicación.

Estos tres pasos se pueden apreciar a detalle en la figura 2.5.

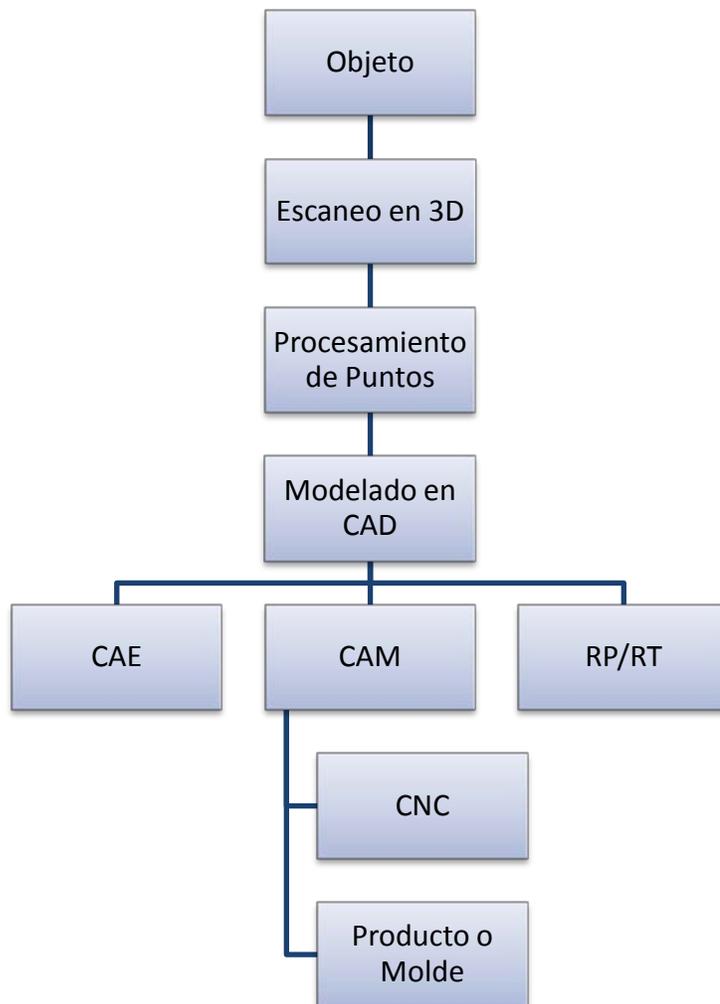


Figura 2.5 Proceso de la Ingeniería Inversa

El seguimiento de estos pasos es esencial para realizar una ingeniería inversa, pero también es muy importante realizar una estrategia para llevar a cabo esos pasos en el menor tiempo posible y con la mayor eficiencia, esta estrategia generalmente consta de:

- ¿Por qué realizar la ingeniería inversa a dicho objeto?
- Número de objetos a digitalizar.
- El tamaño del objeto.
- Complejidad del objeto.
- Material del objeto (metales o no metales).
- Acabado del objeto (brillante u opaco).
- Geometrías involucradas en el objeto (Geometrías primitivas u orgánicas, interiores o exteriores).
- Precisión requerida en el proceso

Al tomar en cuenta todo los puntos mencionados anteriormente se puede asegurar que el proceso sea exitoso en su totalidad y la obtención de un modelo 100% confiable, pues conforme se logre más confiabilidad en este proceso, cada día más la ingeniería inversa seguirá avanzando en la industria, y así mismo las industrias comenzarán a apoyarse de esta disciplina.

2.5 Digitalización

Es importante realizar una clara distinción entre los conceptos de una copiadora 3D y digitalizador 3D. Una fotocopidora toma una pieza de papel y produce otra pieza de papel justo igual a la original. Una copiadora 3D es un dispositivo que toma un objeto sólido y hace otro justo igual al original (ignorando el tipo de material). De hecho, la maquinaria para reproducción de partes, es una tecnología ya establecida desde hace mucho tiempo. Sin embargo, un escáner,

en 2D, no solo permite tener una hoja de texto en la computadora, sino que también reconoce caracteres y figuras, proveyendo un archivo de texto o una estructura gráfica. Similarmente, un digitalizador 3D no solo captura datos en bruto de un objeto, sino que los datos son interpretados y se crea un modelo computacional. Ahora, no solo se puede generar una réplica, sino también el conocimiento de las figuras obtenidas, y por lo tanto se pueden derivar nuevas figuras, realizar variaciones, analizar propiedades y determinar características cualitativas como lo son el volumen y el área superficial.

La digitalización es la fase de la ingeniería inversa que se encuentra involucrada con la estrategia mencionada en el punto anterior, ya que al seleccionar la técnica de digitalización que más se adecue al objeto a digitalizar, preparar el objeto para ser digitalizado y realizar la digitalización del objeto asegura la confiabilidad de dicho proceso y no perder ningún detalle del objeto, lo cual es sumamente importante. Al realizar este proceso tomando en cuenta todas las perturbaciones exteriores, se pueden asegurar índices de error prácticamente nulos, lo que conlleva a una gran competitividad en estos métodos.

Para que un ingeniero sea capaz de tomar decisiones acerca de la técnica de digitalización que utilizará en el proceso, es importante que conozca las técnicas que se utilizan hoy en día para realizar la digitalización, las cuales principalmente son dos: contacto con el objeto y sin contacto con el objeto.

2.5.1 Técnicas de contacto con el objeto

Esta técnica utiliza palpadores que automáticamente siguen el contorno de la pieza a digitalizar (*ver figura 2.6*).



Figura 2.6 Palpador de contacto digitalizando una pieza.

Las ventajas y desventajas de este tipo de técnica son:

Ventajas:

- Cuentan con niveles de precisión muy elevados (por debajo de 1 milésima de pulgada).

Desventajas:

- Toma de datos de baja velocidad.
- Volumen de trabajo limitado a la mesa de trabajo.
- No se pueden realizar digitalizaciones in situ.
- No se puede aplicar a materiales suaves ya que la deformación del material trae como consecuencia datos erróneos.
- Se pueden generar ralladuras en piezas muy delicadas.

2.5.2 Técnicas sin contacto con el objeto

Actualmente es una de las tecnologías que está creciendo con mayor rapidez en el mundo de la ingeniería inversa, en el mercado se pueden encontrar una gran variedad de productos relacionados con ésta técnica.

Este tipo de dispositivos generalmente utilizan un haz de láser, luz blanca, rayos-x aunados a una cámara CCD para obtener los datos (puntos) del objeto (*ver figura 2.7*).



Figura 2.7 Digitalizando un automóvil mediante luz blanca.

Las ventajas y desventajas de esta técnica se enlistan a continuación:

Ventajas:

- Gran rapidez para obtener figuras completas.
- Actualmente cuentan con niveles de precisión muy elevados.
- La mayoría de los equipos de este tipo son portátiles y son capaces de digitalizar in situ.
- Digitaliza sin importar el material.

- No existe volumen fijo de trabajo gracias al software que incluyen dichos dispositivos.
- No genera ninguna alteración a la pieza.

Desventajas

- Menor precisión que una CMM.
- El acabado superficial afecta en la digitalización de los datos.
- No digitaliza superficies paralelas al haz de luz, a menos que se realicen varias tomas del objeto.

En la figura 2.8 se puede observar una comparación entre las dos técnicas, cabe mencionar que para la técnica que no tiene contacto con el objeto, solo se realizó una sola toma del objeto, lo cual provoca que existan áreas en donde se generen sombras provocando así falta de datos como se puede observar en la figura.

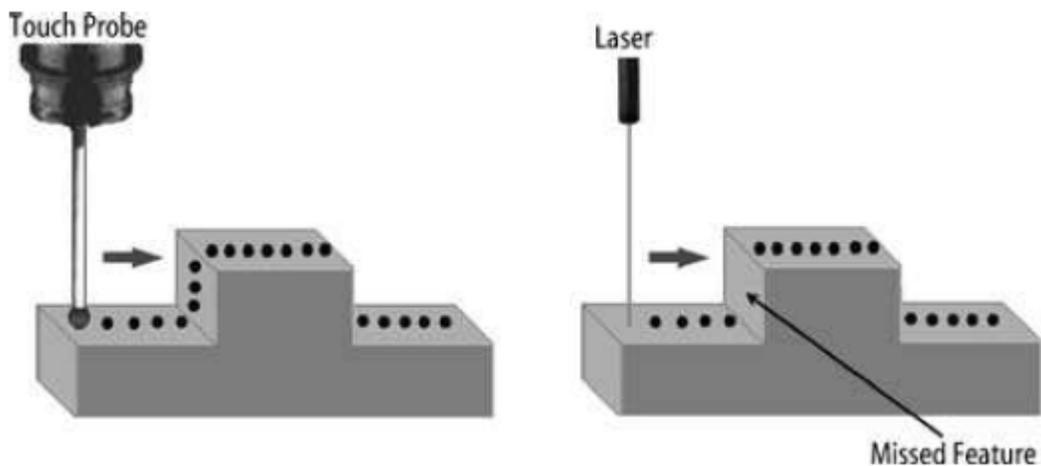


Figura 2.8 Caras verticales; palpador vs laser. Originalmente publicado en "Rapid Prototyping casebook, McDonald, J.A., Ryal, C.J. y Wimpeny, D.I., 2001, © John Wiley e Hijos Limited".

Para la ingeniería inversa es de gran importancia tener conocimiento acerca de los métodos de digitalización que existen en la actualidad. Es posible combinar las diferentes técnicas mencionadas anteriormente, con esto se podría lograr un modelo más cercano al real, sin embargo el tiempo en que se realiza la digitalización sería mayor, por eso una persona que realice ingeniería inversa se debe de apoyar de técnicas tradicionales de metrología pues siempre habrá mediciones que corroborar e inclusive mediciones que obtener.

2.6 Procesamiento de Puntos.

Durante este proceso se importa la nube de puntos al software a utilizar. Existe una gran variedad de software que se dedica a la ingeniería inversa, dentro de los cuales se pueden encontrar: Rapidform, Geomagic, Polyworks, Materialize, entre otros.

El principal objetivo de procesar los puntos en un software especializado es reducir el ruido que se pueda encontrar en los datos, reducir el número de puntos involucrados, eliminar redundancias en los puntos, entre otras cosas. Generalmente se realizan diversas tomas en distintos ángulos del objeto a digitalizar, esto con el fin de obtener gran detalle de dicho objeto. Esto provoca un enorme impacto en las habilidades del usuario para digitalizar, ya que si se realiza una buena estrategia de digitalización, al procesar los puntos el tiempo invertido será mucho menor, pues el uso de herramientas como la alineación de puntos será mucho más sencillo de utilizar y se asegura una menor cantidad de errores en los datos. El resultado del procesamiento de puntos generalmente es una sola nube de puntos que contenga todos los datos, que sea limpia y con una cantidad de puntos menor a los datos obtenidos originalmente.

2.7 Modelado Geométrico dependiendo de la Aplicación

El proceso de generar un CAD a partir de una nube de puntos, cada vez es mucho más sencillo y más rápido, todo esto gracias a las nuevas tecnologías en los algoritmos utilizados para el acoplamiento de superficies a los puntos (surface fitting). Este proceso probablemente sea el más utilizado en la Ingeniería Inversa, pues mediante este se pueden realizar trabajos sobre el diseño de todo tipo, tales como el rediseño o la mejora de productos.

Dependiendo de la aplicación en donde se utilice la Ingeniería Inversa es el tipo de modelado que se realizará. Por ejemplo, si se digitalizan piezas con el objetivo de inspección, existen módulos como el XOV de Rapidform, en donde se importa la nube de puntos y se realiza una comparación con el CAD original y arroja una serie de datos relacionados con las desviaciones puntuales y geométricas del objeto escaneado con respecto al dibujo en CAD original; otro ejemplo es para realizar análisis en CAE (Ingeniería Asistida por Computadora) y no se cuenta con los dibujos originales, en este caso se digitaliza la pieza o el sistema, y se le hace un tratamiento especial durante el mallado de los puntos para que este sea compatible con programas de CAE; y así se pueden ir encontrando una gran variedad de ejemplos en donde el tratamiento y el modelado de los datos cuentan con diversas variaciones para cumplir el objetivo por el cual se realizó la Ingeniería Inversa.

Capítulo 3

Ingeniería Inversa y Modelado del Sistema

3.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se describe el proceso realizado para el rediseño del sistema de roloformado. Dicho proceso consta de una metodología que se mencionará más adelante, el primer paso para realizar la ingeniería inversa fue la digitalización de dicho sistema, una vez que se cuentan con los datos de este sistema, se procedió a realizar la ingeniería inversa, y por último se obtuvo el modelado en CAD del sistema, concluyendo así con el rediseño del sistema de roloformado. Es muy importante seguir la metodología que se describirá en este capítulo, pues un parámetro que se tiene que cuidar en todo momento es la precisión.

3.2 Digitalización de los Castillos de Roloformado.

El primer paso antes de comenzar con la digitalización del sistema de roloformado, es establecer la metodología de trabajo de esta fase (*ver figura 3.1*). La ventaja de trabajar con una metodología preestablecida como en este caso es la rapidez del proceso, la disminución de cualquier error y sobre todo facilitar el proceso de ingeniería inversa.

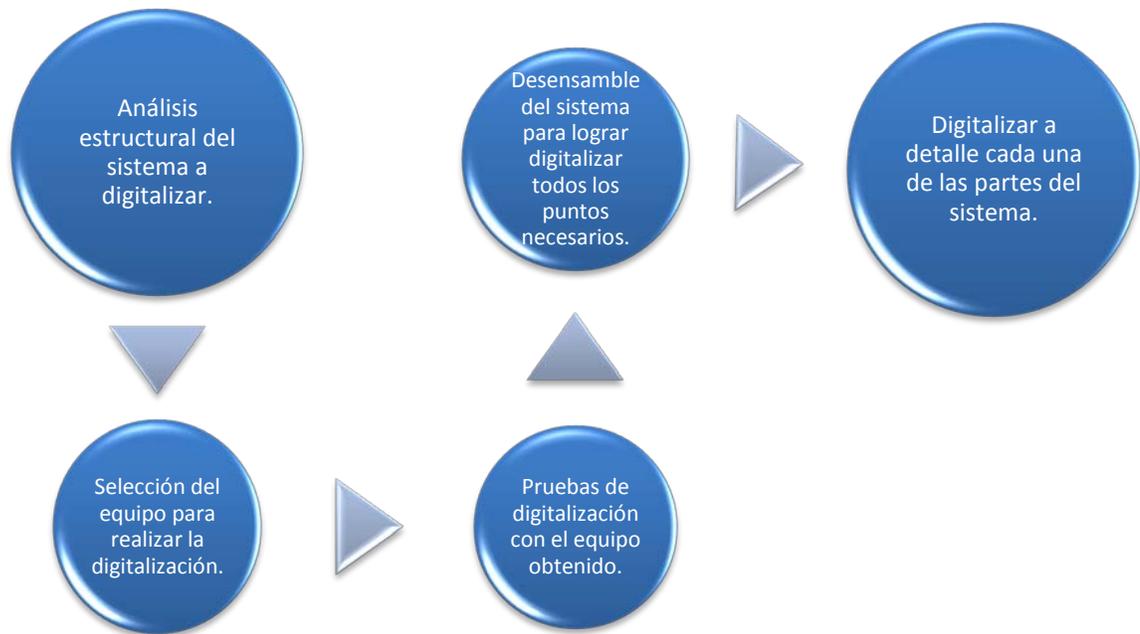


Figura 3.1 Metodología de Trabajo para la Digitalización.

3.2.1 Análisis estructural del sistema a digitalizar.

El primer paso en la metodología para digitalizar cualquier objeto es el análisis de dicho objeto, en este caso es necesario realizar un análisis estructural ya que el sistema (*ver figura 3.2*) consta de muchas partes. Es de suma importancia realizar un análisis visual del sistema para planear la manera con la cual se atacará la digitalización de este, generalmente con la experiencia no es necesario realizar este primer paso, pero al realizarlo se puede asegurar que el proceso de digitalización seleccionado sea el correcto desde que se comienza.



Figura 3.2 Castillo de Roloformado.

Se puede apreciar claramente que el sistema es algo complejo para ser digitalizado en unas cuantas tomas, este punto es crítico para realizar la selección del equipo y de la técnica a utilizar para la digitalización. De igual manera se puede apreciar que en el interior de dicho sistema se cuentan con partes pequeñas las cuales realizan grandes funciones dentro de él, haciendo necesario el desensamble completo del sistema. Es muy importante considerar el material del sistema, y el cual es mayormente acero con diferentes grados y que se cuentan con piezas con un grado de reflectividad mayor a otras, una condición sumamente importante al realizar la digitalización, pues esto puede afectar durante la adquisición de datos.

Lo observado es suficiente para continuar con el proceso y así proceder a la selección del digitalizador y de la técnica más adecuada para la realización de la ingeniería inversa.

3.2.2 Selección del equipo digitalizador.

Es importante considerar lo observado en el punto anterior, pues esto será de vital importancia durante la selección del equipo digitalizador. Anteriormente se explicó la diferencia entre las técnicas existentes de digitalización, las cuales son de contacto y no contacto con el objeto a digitalizar.

Se descartó desde un principio la técnica de contacto, pues ésta técnica implica trasladar el sistema de roloformado al laboratorio para que este sea digitalizado, lo cual es imposible ya que el sistema se encuentra en constante trabajo en el proceso y no podrá ser deshabilitado. Por esta razón se decidió que la técnica a utilizar fuera la de no contacto.

Dentro de esta técnica existe una gran variedad de digitalizadores, los cuales varían principalmente en el tipo de luz que hacen reflejar en el objeto.

Se definen los siguientes parámetros: método de no contacto, portátil, grandes precisiones, limitantes de tamaño nulas, reflectividad del material controlable, un equipo que se adapta y cumple con los parámetros mencionados anteriormente es un digitalizador distribuido por Konica Minolta, Range 7 (*ver figura 3.3*).



Figura 3.3. Konica Minolta Range 7 (Tomada de www.konicaminolta.com.mx).

A continuación en la tabla 1 se presenta la ficha técnica proporcionada por el fabricante del digitalizador 3D.

Tabla 1. Especificaciones del Digitalizador Range 7 de Konica Minolta.

Especificaciones de KONICA MINOLTA RANGE 7						
Método de Medición		Triangulación por el método de luz seccionada.				
Fuente de Luz		Laser semiconductor, Longitud de onda: 660 nm.				
Clase del Laser		Clase 2 (IEC 60825 - 1 Edición 2)				
Número de Píxeles Obtenidos		1.31 megapíxeles (1280 x 1024)				
Distancia de Medición		450 a 800 mm				
Lentes Receptores		TELE, WIDE				
Rango de Medición (mm)	Distancia	TELE 450 mm	TELE 800 mm	WIDE 450 mm	WIDE 800 mm	
	Dirección	X x Y	79 x 99	141 x 176	150 x 188	267 x 334
		Z	54	97	109	194
Precisión (Distancia entre esferas)* ¹		±40µm				
Precisión (Z,σ)* ²		4 µm				
Auto-Enfoque		Sí				
Auto-Exposición		Sí				
Tiempo de escaneo		Aproximadamente 2 segundos por toma.				
Función de vista preliminar		Aproximadamente 0.4 segundos por toma.				
Condiciones de luz ambiental durante escaneo		500 lx o menos				
Interface de salida		USB				
Alimentación		Incluye Adaptador AC Voltaje de entrada: 100 a 240 VCA(50 - 60 Hz.) Corriente: 1.4 A (100 VCA)				
Dimensiones		295 (W) x 190 (H) x 200 (D) mm excluyendo las agarraderas.				
Peso		Aproximadamente 6.7 Kg.				
Temperatura de Operación / Rango de humedad		10 a 40° C / Humedad relativa del 65% o menor (sin condensación)				
Storage temperatura / rango de humedad		- 10 a 50°C / Humedad relativa del 85% o menor (a 35°C, sin condensación)				

*1 Al medir la distancia entre dos esferas como se define en VDI/DE 2634-2 bajo las condiciones de medición del sensado de Konica Minolta. Condiciones de medición del sensado de Konica Minolta: Temperatura: 20±1°C; Lente: TELE; Distancia de Medición: 450 mm; Pre calentamiento: 20 min.; Software utilizado: Range Viewer, software de procesamiento de Konica Minolta; Después de calibrar el instrumento; Objetivo de medición: estándar de 2 esferas de Konica Minolta; Arreglo del objetivo de medición: Arreglo estándar de Konica Minolta (10 posiciones dentro del espacio de medición); Incertidumbre del objetivo estándar no incluida.

*2 Condiciones de Medición: Temperatura: 20±1°C; Lente: TELE; Distancia de Medición: 450 mm; Pre calentamiento: 20 min.; Objetivo de medición: tabla planar estándar de Konica Minolta; Software utilizado: Range Viewer, software de procesamiento de Konica Minolta; valor de 1 σ.

En la figura 3.4 se muestra la configuración del Sistema de digitalización 3D Konica Minolta Range 7.

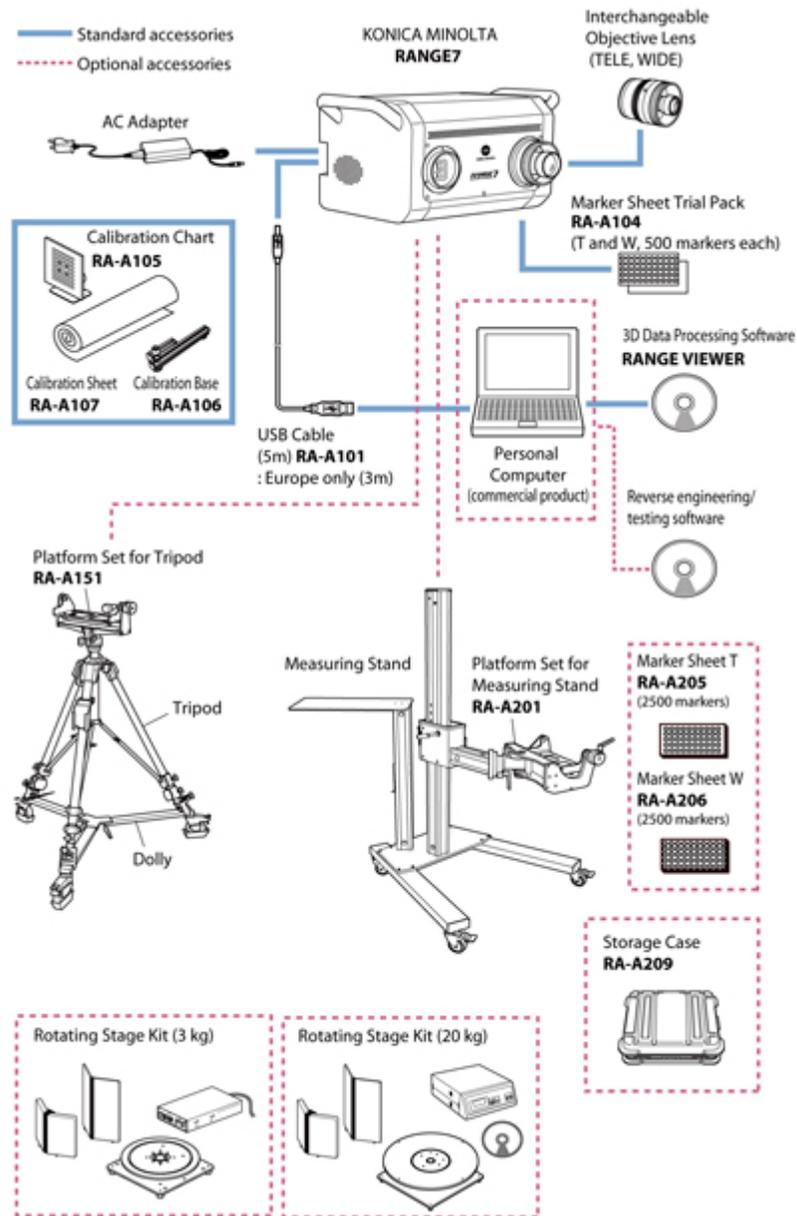


Figura 3.4. Configuración del Sistema a Utilizar (Tomada de www.konicaminolta.com.mx).

Con los datos proporcionados por el fabricante se puede apreciar claramente, que dicho digitalizador cuenta con las especificaciones necesarias para la digitalización del sistema en su totalidad, asegurando que la precisión de dicho sistema sea por debajo de μm . 40. Es importante mencionar que existe incertidumbre en las mediciones realizadas con equipos de esta índole [27], dichas incertidumbres son eliminadas en el proceso de modelación ya que el principal objetivo es rediseñar el sistema.

3.2.3 Desensamble del sistema.

Como se puede observar en la figura 3.2, el sistema consta de un castillo en donde se encuentran sostenidos los distintos tipos de rodillos del roloformado, el castillo es repetitivo en los 21 pasos con los cuales consta este proceso. Es visible la gran variedad de materiales y de partes con las que cuenta este sistema por lo cual es sumamente importante realizar el desensamble del sistema, así como también asignar un número a cada una de las partes para llevar un orden y trabajar metodológicamente.

En la figura 3.5 se puede apreciar el conjunto de partes con las que cuenta el sistema de roloformado. Se puede apreciar en la figura la diferencia de tamaños entre cada una de las piezas involucradas en el sistema, por lo que al realizar el escaneo tridimensional es de suma importancia utilizar la metodología de digitalización adecuada para cada una de las partes.



Figura 3.5. Desensamble realizado en planta.

En la tabla 2 se presenta la nomenclatura utilizada para identificar a cada una de las partes, así como también una descripción de su funcionamiento y una imagen de ella para su correcta identificación.

Tabla 2. Listado de componentes identificados en el desensamble.

<i>Pieza</i>	<i>Descripción</i>	<i>Imagen</i>
Pieza Inferior Casete 1	Soporte Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	

Pieza Media 1 Casete 1	Soporte Medio Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	
Pieza Media 2 Casete 1	Soporte Medio Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	
Pieza Superior Casete 1	Soporte Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	
Pieza Inferior Casete 2	Soporte Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.	
Pieza Media 1 Casete 2	Soporte Medio Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.	
Pieza Media 2 Casete 2	Soporte Medio Superior del casete derecho de la torre de roloformado.	

Pieza Superior Casete 2	Soporte Superior del casete derecho de la torre de roloformado.	
Flecha	Flecha principal que da soporte a los rodillos del proceso de roloformado.	
Flecha Casetes	Flecha de ensamblaje entre soportes inferior, medio 1, medio 2 y superior de los casetes de roloformado.	
Tapa Engrane Mayor	Alberga al engrane mayor y engrane menor que se ensamblan en la flecha.	
Soporte flecha media 1	Provee soporte a la pieza 1 la cual se ensambla junto con algunos rodamientos a la flecha.	
Perno Engrane Menor	Traba o destraba el giro del engrane menor.	

<p>Engrane Mayor</p>	<p>Se ensambla con la flecha principal y permite detener el giro de tal flecha gracias a su unión con el engrane menor.</p>	
<p>Engrane Menor</p>	<p>Se ensambla con tapa de engrane mayor y mediante el perno de engrane menor impide el movimiento del engrane mayor.</p>	
<p>Tuerca Flecha</p>	<p>Tuerca M70 que sostiene el ensamble realizado de rodamientos y otras piezas en la flecha.</p>	
<p>Cuña de Flecha</p>	<p>Impide que giren los rodillos y los separadores ensamblados en la flecha.</p>	
<p>Soporte Pieza Inferior</p>	<p>Provee el soporte y la separación entre la pieza inferior y la pieza media 1.</p>	
<p>1</p>	<p>Da albergue a rodamientos que permiten el giro libre de las flechas.</p>	

2	Pieza que permite el contacto entre los rodamientos localizados en las piezas medias del casete derecho y la flecha.	
3	Pieza que provee separación entre rodamientos y tuerca en la flecha.	
4	Separador entre rodillos, los hay de diversas longitudes.	

3.2.4 Digitalización del sistema

Para la digitalización del sistema se utilizó, como se mencionó anteriormente un digitalizador 3D Konica Minolta Range 7, este equipo cuenta con un software propio para la adquisición de los puntos llamado Range Viewer, las especificaciones de dicho software se muestran en la tabla 3.

Una vez que se encuentran las partes identificadas se propone la metodología de trabajo para este punto, porque es importante conocer que piezas necesitan de algún tratamiento superficial y cuáles no lo necesitan, identificar geometrías complejas y geometrías de volumen mayor. Estos puntos son esenciales en la toma de decisiones de este paso.

Tabla 3. Especificaciones de Range Viewer.

Formatos que puede leer.	Formatos de propiedad de Konica Minolta, .rgv (nube de puntos de un solo scan), .rvm (múltiples datos)
Formatos de salida.	Grupo de puntos ASCII; Grupo de puntos binarios (incluyendo vectores normales)
	Formatos propios de Konica Minolta, .rgv, .rvm
Funciones de medición.	Monitoreo de imagen; vista preliminar, AF/AE, Medición.
	Control de la estación rotatoria (accesorio opcional de Konica Minolta)
Funciones de edición.	Alineación de datos, Combinación de datos, eliminación de grupo de puntos.
Dibujo	Sombreado de grupo de puntos.
Sistema Operativo	Windows Vista 64-bit
CPU	Core2 Duo, Xeon, o mejor.
RAM	4 Gb o más.
Video	1280x1024 o mejor
Tarjeta de Video	Tarjeta compatible con OpenGL
Interface	Puerto USB

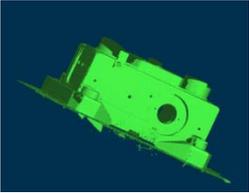
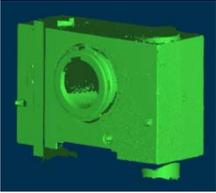
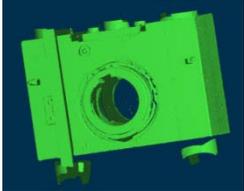
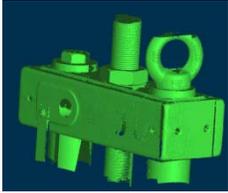
Ya tomados en cuenta los puntos mencionados anteriormente se propone la siguiente metodología de trabajo.

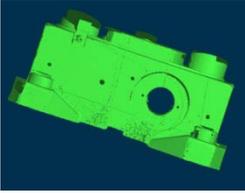
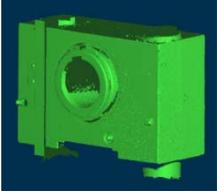
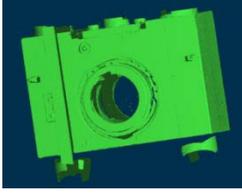
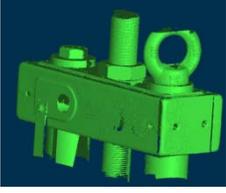
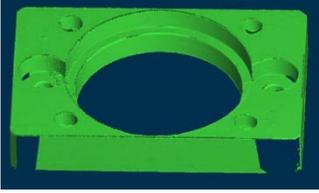
- Digitalizar piezas que no requieran de un recubrimiento superficial.
- Digitalizar piezas que requieren recubrimiento superficial.

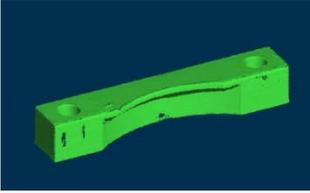
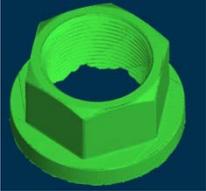
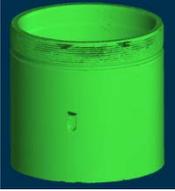
Con estos dos puntos en la metodología y con un trabajo en equipo, es posible realizar una digitalización rápida y eficiente.

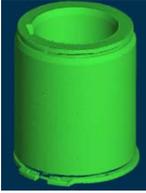
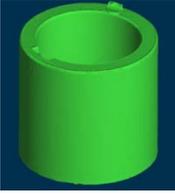
A continuación en la tabla 4 se presenta el listado descrito anteriormente pero a diferencia de la tabla 2 solo se presenta la digitalización de la pieza correspondiente, cabe mencionar que algunas de las partes mencionadas en la tabla 2 no se encuentran presentes en la tabla 4, esto debido a que se utilizó la metrología empleando un Vernier.

Tabla 4. Listado de componentes con datos adquiridos desde el digitalizador.

<i>Pieza</i>	<i>Digitalización</i>
Pieza Inferior Casete 1	
Pieza Media 1 Casete 1	
Pieza Media 2 Casete 1	
Pieza Superior Casete 1	

Pieza Inferior Casete 2	
Pieza Media 1 Casete 2	
Pieza Media 2 Casete 2	
Pieza Superior Casete 2	
Flecha	
Tapa Engrane Mayor	

<p>Soporte flecha media 1</p>	
<p>Perno Engrane Menor</p>	
<p>Engrane Mayor</p>	
<p>Engrane Menor</p>	
<p>Tuerca Flecha</p>	
<p>1</p>	

2	
3	
4	

Es posible apreciar en algunas imágenes que los datos se pueden considerar incompletos y que hacen falta geometrías, esto es debido a que muchas geometrías se considera innecesario realizar su digitalización ya que son piezas simétricas, o en su defecto son mediciones que fácilmente se pueden obtener mediante metrología convencional, y esto ayuda al operador que realiza la ingeniería inversa pues hace del proceso más eficiente y reduce los tiempos de operación del digitalizador. Cabe mencionar que el resultado final de la ingeniería inversa no será afectado por la combinación de técnicas, como se podrá apreciar en el siguiente punto.

3.3 Ingeniería Inversa de los Datos adquiridos desde el Digitalizador.

Se mencionó en puntos anteriores que existen diversos software dedicados a la ingeniería inversa en el ámbito ingenieril, el software que en la actualidad cuenta con metodologías de ingeniería inversa de tercera generación (utilización de NURBS para generar

superficies) y con el que se pueden obtener modelos tridimensionales totalmente paramétrico es el software distribuido por INUS technology, Rapidform XOR, el cual fue utilizado para la ingeniería inversa.

Hasta este punto, se cuenta con la nube de puntos de cada una de las partes (tabla 3), como se mencionó en el capítulo 2 (figura 2.5), aún existe un largo camino por recorrer para obtener un modelo tridimensional el cual pueda ser fabricado a través de CAM (Manufactura asistida por Computadora), esto debido a que el prototipo no será fabricado mediante técnicas convencionales de prototipado rápido.

A continuación, se presentan los pasos que se siguieron para la obtención de un modelo tridimensional a partir de una nube de puntos adquirida por un digitalizador.

Paso 1. Importar nube de puntos de manera que se importe ya triangulada; el software Rapidform cuenta con la capacidad de importar sólo una nube de puntos o una malla al seleccionar sólo una opción desde el menú Importar.

Paso 2. Realizar una alineación entre las mallas; Rapidform cuenta con algoritmos de alineación inteligentes, a los cuales solo hay que se le indica la manera en la cual debe realizarse la alineación.

Paso 3. Combinar las mallas para obtener una sola malla sin redundancia de puntos; esto se logra utilizando el comando “volumen merge”, el cual considera que las mallas en conjunto son un volumen.

Paso 4. Corregir imperfecciones de la malla; para obtener una malla limpia, lo anterior se obtiene al realizar un procesamiento directamente en la malla, esto es, llenado de huecos, corrección de errores, entre otros.

Paso 5. Realizar un reconocimiento de regiones; Rapidform cuenta con la capacidad de detectar distintos tipos de geometrías en las mallas, lo cual es de gran ayuda pues se puede encontrar con mayor facilidad las geometrías de referencia de la pieza.

Paso 6. Establecer el origen en el punto deseado; después de encontrar las geometrías de referencias se procede a seleccionar las geometrías de referencia para establecer el origen-

Paso 7. Construcción de croquis en región deseada para copiar figuras; en este paso se comienza con la reconstrucción y el rediseño de la pieza deseada.

Paso 8. Realizar el paso 7 en cada una de las operaciones que se desee obtener su geometría.

Paso 9. Exportar el sólido obtenido al programa de CAD deseado.

3.4 Modelado en CAD del Sistema.

Mediante los pasos presentados en el punto anterior, se obtuvo un modelo 100% paramétrico del modelo rediseñado en el software de CAD deseado, en este caso el software a utilizar será el SolidWorks.

Debido a que ya se cuentan con todas las partes necesarias del castillo de roloformado en CAD, se comienza a realizar el ensamblaje de dicho sistema para verificar si existe algún error de modelado y de igual manera se realiza una comparación visual con el modelo original.

Para realizar el ensamblaje de un sistema de este tipo se deben de realizar los siguientes pasos:

Paso 1: Realizar un análisis de la posición de cada una de las piezas en el modelo original.

Paso 2: Toma de video del desensamble y ensamble del sistema original.

Paso 3: Analizar el video y comenzar con el ensamble en SolidWorks.

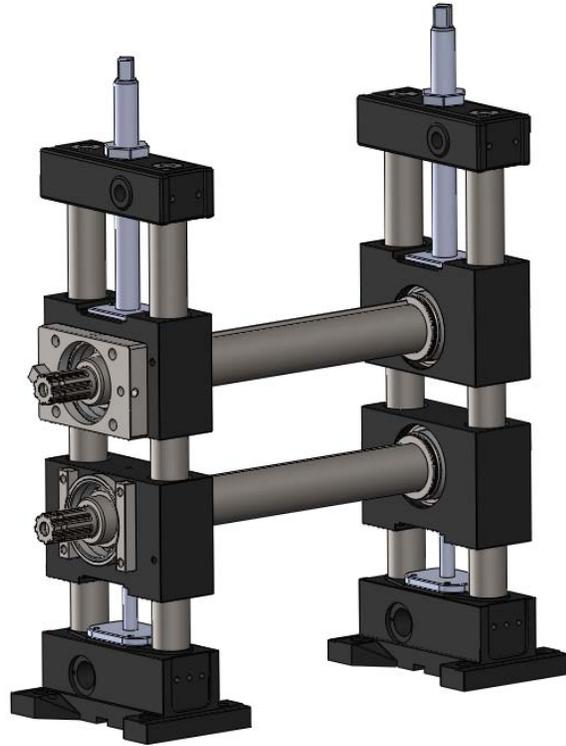
Paso 4: Establecer el origen del sistema.

Paso 5: Insertar la pieza que se considerará origen en el sistema.

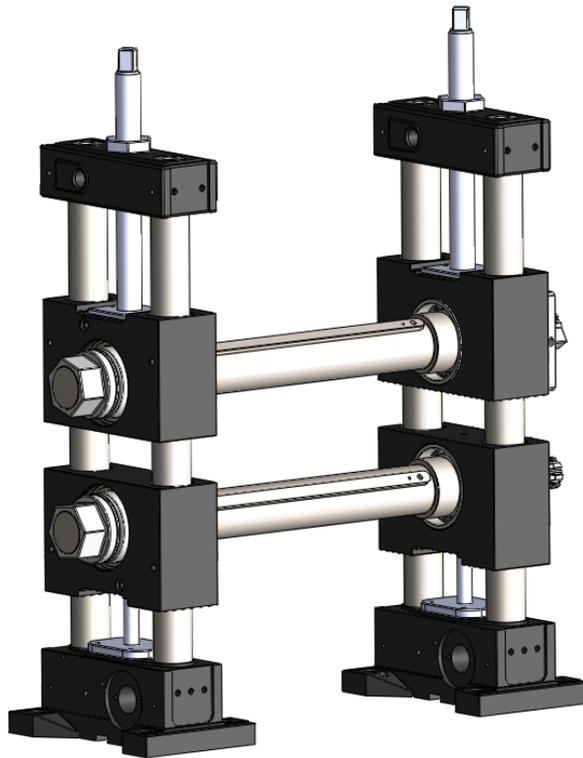
Paso 6: Insertar pieza consecutiva y establecer relaciones de posición.

Paso 7: Repetir el paso 6 con cada una de las piezas.

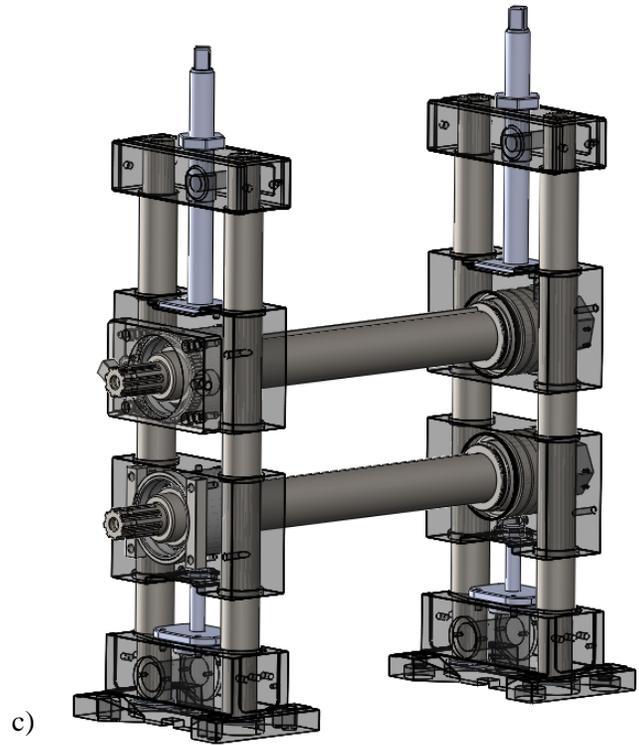
Hasta este punto se cuenta con un ensamble en SolidWorks del sistema rediseñado como se muestra en la figura 3.



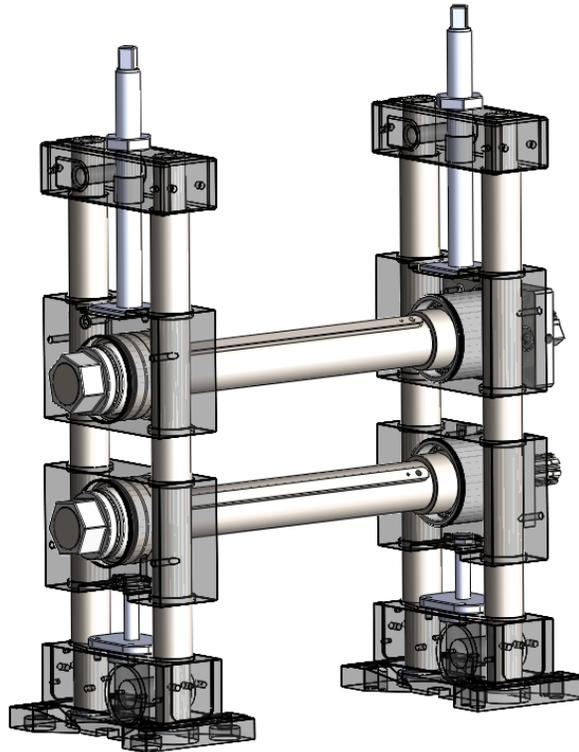
a)



b)



c)



d)

Figura 3.6 Ensamble en SolidWorks del castillo de Roloformado, a) y b) Diferentes vistas sin detalles internos, c) y d) Diferentes vistas con detalles internos.

Si se realiza una comparación con el modelo original se puede notar claramente que se realizaron diversos cambios en la estructura para facilitar su fabricación, reducir costos y peso del sistema. En la tabla 5 se enuncian y describen las diferencias entre los modelos.

Tabla 5. Diferencias entre modelos.

<i>Modelo Actual</i>	<i>Modelo Propuesto</i>
Piezas Superiores, Piezas Medias y Piezas Inferior son vaciadas.	Dichas piezas son huecas, de tal manera que se logra la misma estabilidad del sistema reduciendo el peso.
Rodamientos importados.	Rodamientos universales.
Tornillería poco común en el mercado.	Tornillería convencional y de grado.
Procesos de fabricación complejos.	Procesos de fabricación convencionales.

El modelo mostrado en la figura 3.6 es considerado el modelo final del rediseño y se continuará con la caracterización de materiales y la selección de ellos para cada una de las partes del sistema, así como su construcción.

Capítulo 4

Caracterización de

Materiales

4.1 Introducción

La caracterización de materiales se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas.

A lo largo del presente capítulo se describen las técnicas y los resultados de la caracterización de los materiales utilizados en el sistema original, esto con el fin de conocer los materiales con los cuales fue fabricado el sistema y de esa manera seleccionar materiales más eficientes, con las mismas o mejores propiedades y más económicos de los que cuenta actualmente, este proceso de selección se muestra en el capítulo 5.

4.2 Definición de las Piezas a caracterizar y de la Técnica a utilizar.

Es muy importante que se defina en primera estancia cuales son las partes de interés para la caracterización.

Anteriormente en la tabla 2 se describieron los componentes identificados en el sistema de roloformado, cada uno de ellos con un papel muy importante en el sistema. Debido a esto se decidió realizar la caracterización a cada uno de ellos y así conocer el material con el cual están fabricados dichos componentes.

Se presentó una problemática para la obtención de muestras del sistema. Debido a que el sistema se encuentra en constante funcionamiento es imposible obtener muestras significantes de cada una de las partes, por lo que se obtuvo solamente rebaba de cada una de éstas piezas y datos de dureza de cada una de las mismas, en algunos casos solo se obtuvieron durezas de los materiales ya que no se autorizó la obtención de muestras físicas de los materiales, por lo cual la caracterización de éstos se basa en una lista de probables materiales dependiendo de la dureza y de su aplicación.

Al obtener solamente rebaba de cada una de las partes, la técnica de caracterización se limita enormemente, por lo que se realizan análisis semicuantitativos en la mayoría de ellas, con ayuda de la técnica de microanálisis por dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés), técnica que utiliza un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) marca JEOL, modelo JSM-6510LV (*Figura 4.1*), equipado con una unidad de detección EDAX (*Figura 4.2*) la cual tiene las capacidades de identificar dichas energías, y por lo tanto saber qué elementos químicos existen en la muestra.



Figura 4.1. Microscopio Electrónico de Barrido.



Figura 4.2 Unidad de detección EDAX-EDS.

4.3 Caracterización de cada una de las Piezas

Como se mencionó anteriormente existe una limitante en la obtención de muestras, dependiendo de las muestras que se obtengan y los datos obtenidos, se procede a realizar la caracterización de los materiales ya sea mediante análisis semicuantitativo, o por predicción del

material teniendo como dato la dureza del material y su principal aplicación, con esto se puede conocer de una manera muy precisa el material utilizado en dicha parte del sistema. En la figura 4.3 se presenta esquemáticamente la metodología utilizada. Existen diversas herramientas digitales [19] las cuales permiten realizar una búsqueda de los materiales en base a diferentes características, de todas ellas se utilizará el paquete llamado CES (por sus siglas en inglés, Cambridge Engineering Selector, www.grantadesign.com), el cual cuenta con información muy completa, la cual abarca todas las propiedades, composiciones y diferentes características de los materiales y cuyas referencias son los handbooks de la ASM principalmente, entre otras más



Figura 4.3 Metodología utilizada para la Caracterización de Materiales.

A continuación se desglosa la caracterización y el material resultante de cada una de las partes del sistema:

4.3.1 Blocks (Piezas Superiores Casete 1 y 2, Piezas Medias 1 y 2 de los Casete 1 y 2, Piezas Inferiores Casete 1 y 2, tapa de engrane mayor, soporte de flecha media)

El conjunto de piezas que conforman a los bloques principales de la estructura son de un mismo material, ya que la función que desempeña cada uno de ellos es la misma. Un análisis visual de este conjunto de piezas permite saber que el proceso de fabricación y el material utilizado en éstas es el mismo, es claro apreciar que dichas piezas son producto de un vaciado.

La empresa propietaria del sistema, proporcionó una pequeña muestra de los blocks así como rebabas de dichas piezas las cuales se pueden observar en la figura 4.4. Con el material proporcionado fue posible realizar metalografías y un microanálisis por medio de EDS sobre dicho material.

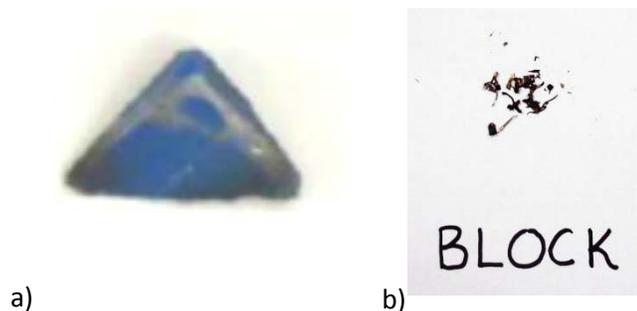


Figura 4.4.a) Muestra de block, b) Rebaba de los Blocks.

En primer instancia se realizaron diversas metalografías sobre la muestra del block mostrada en la figura 4.4 a). Para la realización de metalografía se siguió el proceso estandarizado de lijado, pulido y ataque químico. El ataque químico se realizó con el reactivo

llamado NITAL (2-10 mL HNO₃, 90-98 mL de etanol o metanol). Las metalografías fueron realizadas en diversas áreas a lo largo de la pieza y los resultados obtenidos de ellas se muestran en la figura 4.5.

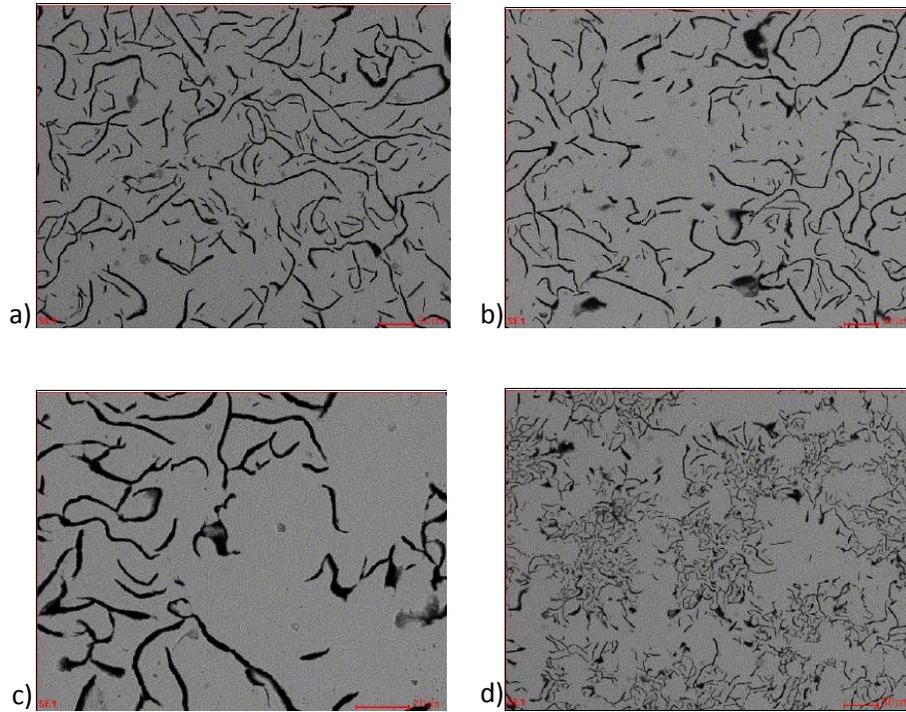


Figura 4.5. Metalografías en diferentes posiciones del material a diferentes magnificaciones a) Posición 1, b) Posición 2, c) Posición 3, d) Posición 4.

Al observar las metalografías en la figura 4.5 y al realizar una comparación con los datos proporcionados por ASM [28] (figura 4.6) es claro observar que presentan una estructura muy similar de grafito en forma de hojuelas en una matriz de hierro.

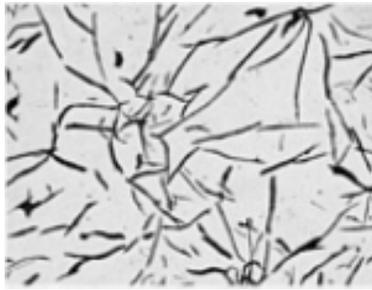


Figura 4.6. Hierro gris con hojuelas de grafito distribuidas uniformemente con direcciones aleatorias a 105x [28].

Con los resultados arrojados hasta este punto es posible definir al material como una fundición de hierro gris, para asegurar estos resultados se procede a realizar un microanálisis semicuantitativo sobre las muestras anteriormente preparadas, los microanálisis fueron realizados particularmente en las secciones mostradas en la figura 4.5, obteniendo como resultado los porcentajes enunciados en la tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de los elementos que componen al material que se analiza.

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje</i>
C	15.12
O	2.09
Al	0.33
Si	1.85
Cr	0.075
Mn	0.91
Fe	79.4

Con lo obtenido tanto por la metalografía y como por el microanálisis semicuantitativo y al realizar una investigación exhaustiva en la base de datos CES (ver figura 4.7), se puede apreciar que el material con el cual se encuentran fabricados dichos componentes es una *fundición de hierro gris de grado 220*.

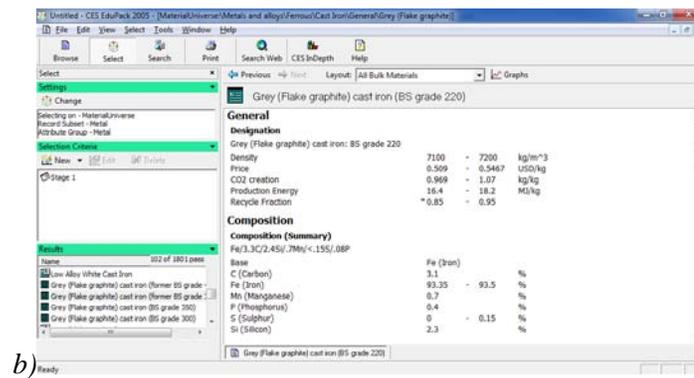
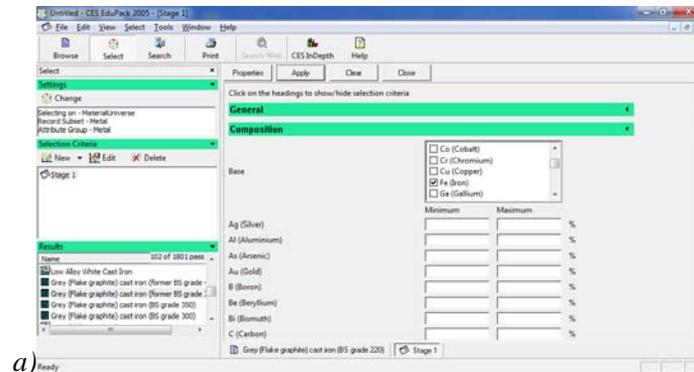


Figura 4.7 a) Composición del material a buscar, b) Resultado de la búsqueda en base a la composición.

4.3.2 Engrane Mayor

En particular para algunos tipos de partes del sistema no se obtuvieron muestras de ningún tipo, siendo el caso del engrane mayor. Sin embargo, se obtienen los datos de dureza de dicha pieza y su principal aplicación, siendo esto datos de gran utilidad para predecir el material utilizado para la fabricación de ella.

La dureza del engrane mayor es de: 83 HRB o 159 HV. La metodología utilizada para calcular la dureza, según la empresa proveedora de dichos datos, fue mediante un método lineal en donde se tomaron entre 5 y 10 mediciones de dureza de manera lineal a lo largo de la pieza.

Al realizar una investigación exhaustiva en la base de datos CES, sobre los posibles materiales con los cuales puede ser fabricado se concluye que el material de fabricación que cuenta con dichas características es: *acero de la serie 4600 de AISI*.

4.3.3 Engrane Menor

El mismo caso se presenta para el engrane menor, al ser una parte de extrema importancia en el sistema no existe la posibilidad de obtener una muestra significativa para utilizar algún método de caracterización que nos permita conocer el material con gran precisión, por lo cual mediante la dureza y su aplicación se predecirá el material con el cual se encuentra fabricado.

La dureza del engrane menor es: 92 HRB o 195 HV. La medición de dureza en dicha pieza se realizó, según la empresa proveedora de los datos, de manera aleatoria en 5 puntos diferentes de la pieza. Al realizar una investigación exhaustiva sobre los posibles materiales con los cuales puede ser fabricado se concluye que el material de fabricación es: *acero de la serie 4600 de AISI*.

4.3.4 Pieza #1 (ver tabla 2).

Igual que en casos anteriores los datos proporcionados de la pieza #1 son limitados, ya que solo se cuenta con la dureza del material y su aplicación, debido a esto, siendo el mismo caso que en casos anteriores solo se predice el material que se utilizó para su fabricación.

La dureza de la pieza #1 es: 42 HRC o 412 HV; la metodología utilizada para la obtención de dureza en la pieza #1 es mediante la obtención de datos de manera aleatoria, los datos obtenidos durante la medición según la empresa que provee los datos fueron de 10

obtenidos en diferentes puntos, cuyo promedio es el valor presentado. En el capítulo anterior en la tabla 2 se mencionan las funciones principales de ésta pieza, siendo éstas de suma importancia para predecir el material del cual se encuentra fabricada. Después de una investigación exhaustiva con las condiciones anteriormente mencionadas se concluye que el material utilizado para la fabricación de la pieza #1 es: *un acero AISI H13*.

4.3.5 Pieza #2 (ver tabla 2),

Al igual que en la mayor parte de las piezas, se carece de espécimen del material a analizar, solo se cuentan con los datos de dureza y la aplicación del material. La pieza #2 juega un papel muy similar a la pieza#1 en el sistema, y al comparar la dureza de la pieza #2 la cual es: 42 HRC o 412 HV, al igual que en las piezas anteriores se realizaron 10 mediciones en posiciones aleatorias a lo largo del material. Realizando un análisis en la función que cumple la pieza #2 y en base a la dureza obtenida se concluye que el material con el cual se fabricó es: *acero AISI H13*.

4.3.6 Pieza #3 (ver tabla 2),

La pieza #3 funciona de separador entre un dispositivo de sujeción y unos rodamientos, la dureza de la pieza #3 es de 42 HRC o 412 HV; la obtención de la dureza se realizó mediante la obtención de datos de manera aleatoria a lo largo de la pieza, se tomaron 10 mediciones para luego promediar el resultado. Con estos datos es posible predecir el material del cual está fabricada, ya que en particular la pieza #3 no juega un papel muy crítico dentro del funcionamiento del sistema. Después de una investigación acerca de los posibles materiales

utilizados para la fabricación de dicha pieza, se concluye que el material utilizado es: *acero AISI H13*.

4.3.7 Pieza #4 (ver tabla 2),

Dentro del sistema la pieza #4 realiza una función de posicionar el rodillo principal, por lo que existen varias piezas de éstas de distinta longitud, y al igual que en casos anteriores no se permitió la obtención de muestras de dicha pieza, sólo se nos proporcionó el dato de la dureza del material y de su aplicación.

La dureza de la pieza #4 es de: 90 HRB o 185 HV, para la obtención de la dureza mencionada se tomaron 10 mediciones de manera lineal a lo largo de la pieza, para luego promediar los resultados y obteniendo el valor presentado anteriormente. Se realiza una investigación en los handbooks de ASM de materiales que coincidan con dicha dureza y aplicaciones similares y se concluye que el material con el cual se fabricó la pieza #4 es: *acero de la serie 8600 AISI*.

4.3.8 Flechas

La flecha es uno de los elementos principales dentro del sistema, de dicho elemento se proporciono por parte de la empresa solamente rebaba de ella (figura 4.8) como muestra a caracterizar.



Figura 4.8 Rebaba de la flecha.

Las muestras obtenidas permiten realizar sobre ellas un microanálisis semicuantitativo. El microanálisis se realizó en distintas partes de la muestra, como se muestra en la figura 4.9.

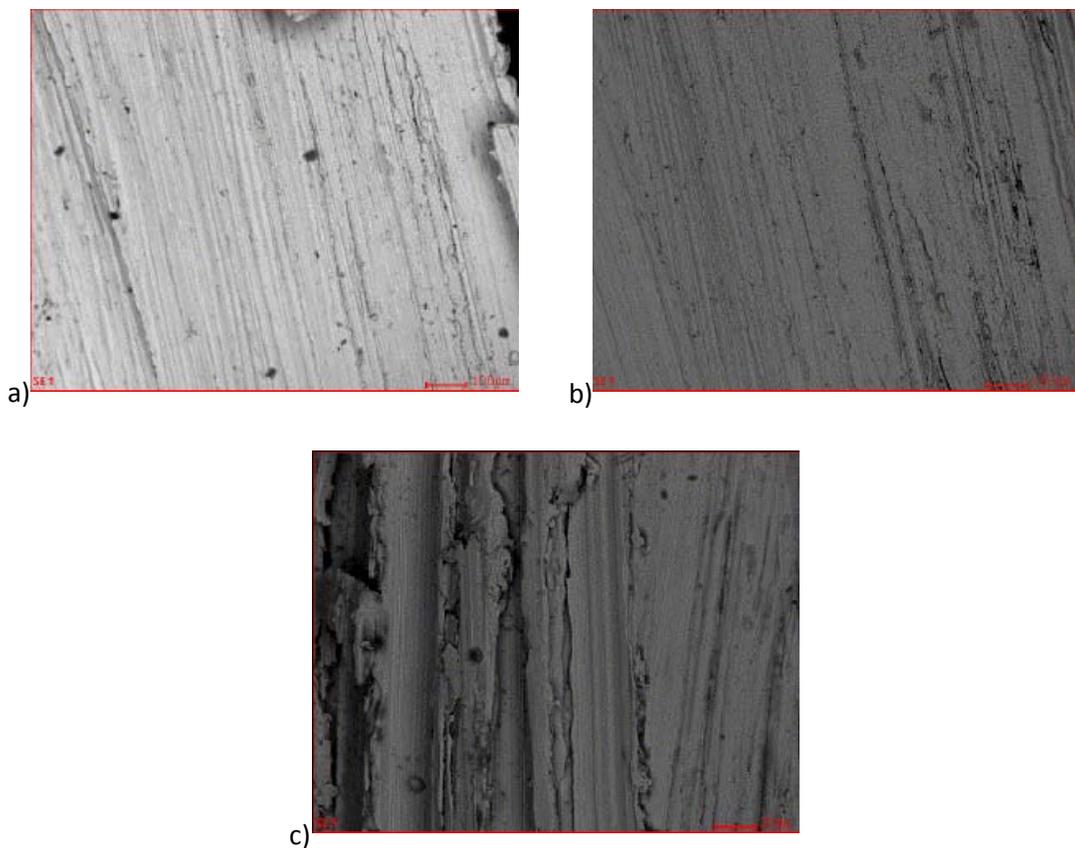


Figura 4.9 Micrografías realizadas en diferentes lugares de la muestra, a) Posición 1, b) Posición 2, c) Posición 3.

El resultado del microanálisis realizado se enuncia en la tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje de los elementos que componen al material que se analiza.

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje</i>
C	8.9
Al	0.48
Si	0.66
Mn	1.02
Fe	88.94

La empresa proporcionó un valor de dureza: 22 HRC o 248 HV; para la obtención de la dureza se realizaron 15 mediciones de manera aleatoria a lo largo de la flecha para luego promediar los valores entre sí y obtener el valor de dureza presentado.

Con los resultados obtenidos en el análisis semicuantitativo de la muestra y el valor de dureza, se realiza una investigación dentro de la base de datos CES y con el proveedor de dicho sistema se concluye que el material con el cual está construida la flecha es: *acero 5160 AISI*.

Ya realizada la caracterización a cada una de las partes del sistema, a continuación en la tabla 8, se presentan los materiales con los cuales han sido fabricadas las partes mencionadas en los puntos anteriores.

Tabla 8. Material de Fabricación de las distintas partes del sistema.

<i>Nombre de Parte</i>	<i>Material de Fabricación</i>
Bloques	Fundición de Hierro Gris grado 22
Flecha	Acero de la Serie 5160
Engrane Mayor	Acero de la Serie 4600
Engrane Menor	Acero de la Serie 4600
Pieza #1	Acero H13
Pieza #2	Acero H13
Pieza #3	Acero H13
Pieza #4	Acero de la Serie 8600

Mediante las técnicas de caracterización de materiales que se utilizaron, se conocieron los materiales de las piezas críticas dentro del sistema, esto fue de gran ayuda para continuar con el siguiente paso, la selección de materiales. Hasta este punto se cuentan con los datos necesarios para seguir la metodología que se menciona en el siguiente capítulo para la selección de materiales.

Capítulo 5

Selección de Materiales

5.1 Introducción

Al conocer el material con el cual está fabricada cada una de las partes del sistema de roloformado, se comienza con la selección de materiales para el nuevo sistema. A lo largo del capítulo se describirá la metodología y los parámetros considerados para realizar la selección de materiales del nuevo sistema.

5.2 Estrategia de Selección

Es importante mencionar que en el presente caso el punto de partida es el sistema original de roloformado, el cual se encuentra 100% funcional en planta. La selección de materiales del nuevo sistema de roloformado se basa principalmente en buscar materiales que cuenten con propiedades mecánicas iguales o similares a los materiales originales, que el proveedor del material se encuentre en la región, y por último buscar que los costos de material se disminuyan sin perder las propiedades que se buscan.

Se han desarrollado diversas estrategias de selección, las cuales se pueden encontrar en textos escritos por Dieter [29]. Charles y compañía [30], Farag [31], Lewis [32], Ashby [17,33-34], Bréchet y compañía [35] y ASM [36], cada uno de ellos siguiendo una metodología similar, dicha metodología se aprecia en la figura 5.1

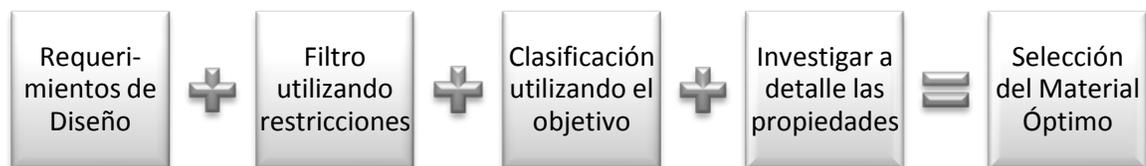


Figura 5.1 Estrategia para la selección de materiales.

5.2.1 Requerimientos de Diseño.

Cada componente de ingeniería cuenta con alguna función en específico, soportar carga, contener presión, transmitir calor, etc. Esto se logra gracias a las limitantes con las que cuenta el componente, dimensiones fijas, soportar cargas o presiones sin presentar alguna falla, conduce o aísla, etc. Al diseñar la pieza siempre se cuenta con un objetivo principal, fabricarla con el menor costo posible, que sea lo más ligera posible, entre otros. Algunos parámetros pueden ser

variados para lograr estos objetivos, las cuales son conocidas como variables libres, ya que al no contar con restricciones se pueden variar según las necesidades que se requieran [18].

El primer paso para relacionar los requerimientos del diseño a las propiedades del material es el correcto establecimiento de la función de la pieza, las restricciones, el objetivo y las variables libres.

5.2.2 Filtros utilizando restricciones.

La correcta selección de materiales requiere que se consideren candidatos todos los materiales existentes hasta que se pruebe lo contrario, esto se logra utilizando los pasos siguientes de los requerimientos del diseño, como se puede apreciar en la figura 5.1. El filtrado tiene como función eliminar todos aquellos candidatos en donde una o más características no se encuentren dentro del rango de las restricciones establecidas, logrando así que el número de candidatos posibles se disminuya.

5.2.3 Clasificación utilizando el objetivo.

Sin embargo el limitar los atributos no es de gran utilidad para clasificar los candidatos que restan. Para realizar esto se necesita un criterio de optimización. Esto se encuentra en los índices del material los cuales miden que tan bien el candidato supera los filtros. El mejor comportamiento algunas veces está limitado por una sola propiedad, y algunas otras por una combinación de ellas. La propiedad o el grupo de propiedades que maximizan el desempeño para un diseño dado son llamadas: índice del material. Existen muchos índices, cada uno asociado con la maximización de algún aspecto del desempeño. Éstos proveen un criterio de

excelencia que permite enumerar los materiales por su habilidad para desempeñar de buena manera una aplicación dada.

5.2.4 Información de soporte de las propiedades de los materiales.

Hasta este punto se ha realizado una lista corta de las alternativas que cumplen con las restricciones y que maximizan o minimizan los criterios de excelencia que son requeridos. Lo más sencillo sería seleccionar la alternativa número 1, pero ¿será lo correcto? Para esto se investiga a detalle el perfil de cada uno por medio del análisis de su ficha técnica.

La ficha técnica del material difiere enormemente a las propiedades utilizadas durante el filtrado. Típicamente es más descriptiva de manera gráfica o pictórica; contiene ejemplos de los usos típicos del material; detalles de su comportamiento en fatiga, ambientes corrosivos; disponibilidad con proveedores; experiencia en su impacto ambiental.

Se considera importante este procedimiento ya que sin el filtrado y sin la clasificación, el número de candidatos es enorme y el volumen de información técnica también. Al investigar a profundidad sobre cada uno de ellos se llega al punto deseado: a un número pequeño de candidatos.

La elección final del material, generalmente depende de las condiciones locales. Debido a esto un procedimiento sistemático no sería de gran utilidad y la decisión se debería de basar en la experiencia local. Esto no significa que el resultado del procedimiento sistemático sea irrelevante, siempre es importante conocer que material es el mejor, inclusive si no se utilizó.

5.3 Metodología para la Selección de los Materiales a utilizar.

A continuación en la tabla 9 se enuncian los componentes que requieren la selección del material, así como una breve descripción de su función, la cual será de gran utilidad para comenzar a establecer las restricciones y así seguir los pasos de la estrategia de selección.

Tabla 9. Componentes a fabricar.

<i>Pieza</i>	<i>Descripción</i>
Pieza Inferior Casete 1	Soporte Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.
Pieza Media 1 Casete 1	Soporte Medio Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.
Pieza Media 2 Casete 1	Soporte Medio Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.
Pieza Superior Casete 1	Soporte Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.
Pieza Inferior Casete 2	Soporte Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.
Pieza Media 1 Casete 2	Soporte Medio Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.

Pieza Media 2 Casete 2	Soporte Medio Superior del casete derecho de la torre de roloformado.
Pieza Superior Casete 2	Soporte Superior del casete derecho de la torre de roloformado.
Flecha	Flecha principal que da soporte a los rodillos del proceso de roloformado.
Flecha Casetes	Flecha de ensamblaje entre soportes inferior, medio 1, medio 2 y superior de los casetes de roloformado.
Tapa Engrane Mayor	Alberga al engrane mayor y engrane menor que se ensamblan en la flecha.
Soporte flecha media 1	Provee soporte a la pieza 1 la cual se ensambla junto con algunos rodamientos a la flecha.
Perno Engrane Menor	Traba o destraba el giro del engrane menor.
Engrane Mayor	Se ensambla con la flecha principal y permite detener el giro de tal flecha gracias a su unión con el engrane menor.

Engrane Menor	Se ensambla con tapa de engrane mayor y mediante el perno de engrane menor impide el movimiento del engrane mayor.
Tuerca Flecha	Tuerca M70 que sostiene el ensamble realizado de rodamientos y otras piezas en la flecha.
Cuña de Flecha	Impide que giren los rodillos y los separadores ensamblados en la flecha.
Soporte Pieza Inferior	Provee el soporte y la separación entre la pieza inferior y la pieza media 1.
1	Da albergue a rodamientos que permiten el giro libre de las flechas.
2	Pieza que permite el contacto entre los rodamientos localizados en las piezas medias del casete derecho y la flecha.
3	Pieza que provee separación entre rodamientos y tuerca en la flecha.
4	Separador entre rodillos, los hay de diversas longitudes.

Ya enlistados los componentes el paso siguiente es definir el material base, como se mencionó en el punto anterior, el material base es la restricción principal para nuestra selección ya que se pretende mejorar dicha selección de material. La definición del material base de cada uno de los componentes se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Definición de material base de cada uno de los componentes.

<i>Pieza</i>	<i>Material Base</i>
Pieza Inferior Casete 1	Fundición de hierro gris
Pieza Media 1 Casete 1	Fundición de hierro gris
Pieza Media 2 Casete 1	Fundición de hierro gris
Pieza Superior Casete 1	Fundición de hierro gris
Pieza Inferior Casete 2	Fundición de hierro gris
Pieza Media 1 Casete 2	Fundición de hierro gris
Pieza Media 2 Casete 2	Fundición de hierro gris
Pieza Superior Casete 2	Fundición de hierro gris
Flecha	Acero de la Serie 5100
Flecha Casetes	Acero de la Serie 5100
Tapa Engrane Mayor	Fundición de hierro gris
Soporte flecha media 1	Fundición de hierro gris
Perno Engrane Menor	Acero de la serie 4600
Engrane Mayor	Acero de la serie 4600
Engrane Menor	Acero de la serie 4600
Tuerca Flecha	Latón
Cuña de Flecha	Acero de la serie 5100
Soporte Pieza Inferior	Fundición de hierro gris
1	Acero H13
2	Acero H13
3	Acero H13
4	Acero de la serie 8600

La siguiente restricción, propuesta por el usuario de dichos componentes es la dureza de algunos de estos componentes, se puede apreciar en la tabla 11.

Tabla 11. Dureza de cada uno de los componentes.

<i>Pieza</i>	<i>Dureza</i>
Pieza Inferior Casete 1	N/A
Pieza Media 1 Casete 1	N/A
Pieza Media 2 Casete 1	N/A
Pieza Superior Casete 1	N/A
Pieza Inferior Casete 2	N/A
Pieza Media 1 Casete 2	N/A
Pieza Media 2 Casete 2	N/A
Pieza Superior Casete 2	N/A
Flecha	22 HRC
Flecha Casetes	22 HRC
Tapa Engrane Mayor	N/A
Soporte flecha media 1	N/A
Perno Engrane Menor	82 HRB
Engrane Mayor	83 HRB
Engrane Menor	92 HRB
Tuerca Flecha	22 HRC
Cuña de Flecha	22 HRC
Soporte Pieza Inferior	N/A
1	42 HRC
2	42 HRC
3	42 HRC
4	90 HRB

Un problema frecuente para los fabricantes de este tipo de componentes son los proveedores de materiales en el país, ya que muchos de los materiales que se requieren se importan lo cual se ve reflejado en el costo, por lo que otra restricción que se agregará a la estrategia es que los proveedores sean locales.

Por último, se hace un análisis detallado de la función que lleva a cabo cada uno de los componentes en el sistema, para así de esa manera establecer la propiedad mecánica más importante para dicho componente y restringir los valores permitidos, logrando así obtener todos los datos necesarios (Tabla 12) para realizar la correcta selección del material.

Tabla 12. Función, restricciones, objetivos y variables libres para cada uno de los componentes.

<i>Pieza</i>	<i>Función</i>	<i>Restricciones</i>	<i>Objetivos</i>
Pieza Inferior Casete 1	Soporte Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Media 1 Casete 1	Soporte Medio Inferior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Media 2 Casete 1	Soporte Medio Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Superior Casete 1	Soporte Superior del casete izquierdo de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.

Pieza Inferior Casete 2	Soporte Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Media 1 Casete 2	Soporte Medio Inferior del casete derecho de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Media 2 Casete 2	Soporte Medio Superior del casete derecho de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Pieza Superior Casete 2	Soporte Superior del casete derecho de la torre de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Flecha	Flecha principal que da soporte a los rodillos del proceso de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Flecha Casetes	Flecha de ensamblaje entre soportes inferior, medio 1, medio 2 y superior de los casetes de roloformado.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Tapa Engrane Mayor	Alberga al engrane mayor y engrane menor que se ensamblan en la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Soporte flecha media 1	Provee soporte a la pieza 1 la cual se ensambla junto con algunos rodamientos a la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.

Perno Engrane Menor	Traba o destraba el giro del engrane menor.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Engrane Mayor	Se ensambla con la flecha principal y permite detener el giro de tal flecha gracias a su unión con el engrane menor.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Engrane Menor	Se ensambla con tapa de engrane mayor y mediante el perno de engrane menor impide el movimiento del engrane mayor.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Tuerca Flecha	Tuerca M70 que sostiene el ensamble realizado de rodamientos y otras piezas en la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Cuña de Flecha	Impide que giren los rodillos y los separadores ensamblados en la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
Soporte Pieza Inferior	Provee el soporte y la separación entre la pieza inferior y la pieza media 1.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
1	Da albergue a rodamientos que permiten el giro libre de las flechas.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
2	Pieza que permite el contacto entre los rodamientos localizados en las piezas medias del casete derecho y la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.

3	Pieza que provee separación entre rodamientos y tuerca en la flecha.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.
4	Separador entre rodillos, los hay de diversas longitudes.	Propiedades Mecánicas del Material base. Abundancia en el mercado mundial.	Reducir peso, costo y optimizar diseño.

En la tabla anterior se establecieron los aspectos más importantes a considerar para la selección de materiales de cada uno de los componentes, esto trae como resultado una lista de posibles candidatos para cada uno de los componentes los cuales se enlistan en la tabla 13.

Tabla 13. Posibles candidatos para cada uno de los componentes.

<i>Pieza</i>	<i>Candidatos</i>
Pieza Inferior Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Media 1 Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Media 2 Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Superior Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Inferior Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Media 1 Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Media 2 Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Pieza Superior Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.

Flecha	Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 4800, 5000, 5100, 8600.
Flecha Casetes	Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 4800, 5000, 5100, 8600.
Tapa Engrane Mayor	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Soporte flecha media 1	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
Perno Engrane Menor	Aceros de las series: 4100, 4600, 5100, 8600
Engrane Mayor	Aceros de las series: 4100, 4600, 5100, 8600
Engrane Menor	Aceros de las series: 4100, 4600, 5100, 8600
Tuerca Flecha	Aceros de las series: 4100, 4600, 5100, 8600
Cuña de Flecha	Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 4800, 5000, 5100, 8600.
Soporte Pieza Inferior	Fundición de hierro gris de grado 100, 150, 180, 200, 220, 250.
1	Aceros al cromo para trabajo en caliente de las series H10, H11, H12, H13, H14, H19, Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 5000, 5100, 8600, Acero para trabajo en frio D2.
2	Aceros al cromo para trabajo en caliente de las series H10, H11, H12, H13, H14, H19, Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 5000, 5100, 8600, Acero para trabajo en frio D2.
3	Aceros al cromo para trabajo en caliente de las series H10, H11, H12, H13, H14, H19, Aceros de las series: 4000, 4100, 4300, 5000, 5100, 8600, Acero para trabajo en frio D2.
4	Aceros de las series: 4100, 5100, 8600

En base a diferentes aspectos como: experiencia del fabricante, datos obtenidos en la tabla 13, y disponibilidad de los proveedores locales; se realiza la selección de los materiales, la cual queda como definitiva en la tabla 14.

Tabla 14. Materiales definitivos para cada uno de los componentes.

<i>Pieza</i>	<i>Material Definitivo</i>
Pieza Inferior Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Media 1 Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Media 2 Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Superior Casete 1	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Inferior Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Media 1 Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Media 2 Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100.
Pieza Superior Casete 2	Fundición de hierro gris de grado 100.
Flecha	Acero de la serie 4140 (tratamiento térmico @650°C, templado en aceite)
Flecha Casetes	Acero de la serie 4140 (tratamiento térmico @650°C, templado en aceite)
Tapa Engrane Mayor	Fundición de hierro gris de grado 100.
Soporte flecha media 1	Fundición de hierro gris de grado 100.
Perno Engrane Menor	Acero de la serie 8620 (normalizado)
Engrane Mayor	Acero de la serie 8620 (recocido)
Engrane Menor	Acero de la serie 8620 (normalizado)
Tuerca Flecha	Acero de la serie 4140 (recocido)

Cuña de Flecha	Acero de la serie 4140 (recocido)
SopORTE Pieza Inferior	Fundición de hierro gris de grado 100.
1	Acero D2
2	Acero D2
3	Acero D2
4	Acero de la serie 8620 (recocido)

Ya seleccionados los materiales, se procede a la fabricación del prototipo del sistema para después ensamblarlo y ponerlo en marcha. Con ayuda de la selección de materiales y de las bases de datos utilizadas, fue posible seleccionar materiales con alta disponibilidad en el mercado, reduciendo el tiempo de entrega de ellos.

Capítulo 6

Discusión

6.1 Introducción

En el presente capítulo se discuten los resultados obtenidos de la experimentación realizada en este trabajo. Además dentro de este capítulo se evalúa el impacto de estos resultados en el costo de producción debido al remplazo de los materiales originales por los propuestos por esta investigación, la reducción de peso debido a estos cambios y la posibilidad de manufacturar localmente las torres del sistema de roloformado. El resultado final de este análisis concretó la realización del primer prototipo funcional de dicho sistema, el cual fue manufacturado y puesto en marcha en la línea de producción de la empresa con quien conjuntamente se realizó este trabajo.

6.2 Digitalización.

Cómo se mencionó en el capítulo 2, la digitalización es la fase de la ingeniería inversa que interpreta los datos y crea un modelo computacional a partir de ellos, como consecuencia, durante los últimos años se han desarrollado diferentes metodologías para la digitalización de objetos, dichas metodologías no se reportan por sus desarrolladores debido a circunstancias fuera de nuestro alcance. Debido a esto se desarrolló una metodología capaz de lograr un proceso eficiente de digitalización.

Dicha metodología fue desarrollada antes de comenzar con la digitalización del sistema, dicho desarrollo se basó en experiencias anteriores con el equipo de digitalización y al realizar detalladamente el sistema a digitalizar, estableciendo restricciones y requerimientos para su digitalización

Como se observó a lo largo del punto 3.2, los resultados obtenidos en el proceso de la digitalización es la nube de puntos de cada una de las partes dentro del sistema, siendo esto el primero paso para la ingeniería inversa del sistema.

Durante la digitalización se presentaron diversas problemáticas para la obtención de los datos requeridos, esto debido a que el sistema a digitalizar se encuentra en constante funcionamiento dentro de planta y solo se permitía digitalizar mientras no se encontraba en funcionamiento, siendo en promedio 3 días al mes, por lo que el proceso de digitalización del sistema entero se realizó en aproximadamente 6 días distribuidos a lo largo de varios meses, siendo esto una gran desventaja para el desarrollo del proyecto. Los inconvenientes anteriores fueron de gran impacto en la digitalización del sistema, ya que muchas piezas del sistema fueron realizados utilizando metrología convencional; por ejemplo, tornillos, tuercas, pequeñas arandelas entre otros, o en su defecto no fue posible obtener datos completos de la digitalización y se utilizó apoyo visual para la construcción de algunas geometrías.

Sin embargo, los resultados globales permitieron desarrollar una metodología específica para la obtención de modelos paramétricos para piezas de gran tamaño con precisión aceptable y obtención de datos rápida.

6.3 Ingeniería Inversa

Cómo se mencionó, al proceso de capturar digitalmente entidades físicas de un componente, se refiere a ingeniería inversa, concepto el cuál es definido por investigadores con respecto a sus tareas específicas [20]. Abbela y coautores describen a la ingeniería inversa como: el concepto básico de producir una parte basada en un modelo original o físico sin la necesidad de un dibujo ingenieril [21]. A su vez, Yau y coautores definen a la ingeniería inversa, como el proceso de recabar nuevas geometrías de una parte manufacturada digitalizando y modificando un modelo CAD existente [22].

La ingeniería inversa desarrollada en el presente trabajo contó con algunas dificultades:

- Pocos datos de digitalización obtenidos.
- Datos obtenidos con metrología convencional.
- Alta precisión requerida.
- Rediseño de sistema para el desarrollo de un sistema flexible.

El planteamiento de una metodología para la ingeniería inversa ayudó en gran medida al desarrollo de la ingeniería inversa del sistema. El punto 3.3 muestra la serie de pasos utilizados para el proceso del modelado de ingeniería inversa, dichos pasos es la metodología natural para obtener los dibujos requeridos, éstos en su gran mayoría, son sugeridos por desarrolladores de software de ingeniería inversa [26].

En algunos casos se utilizaron métodos no reportados por otros autores los cuales son obtenidos en base a la experiencia del usuario, dichos métodos implican la mezcla de los datos obtenidos desde el digitalizador con los datos obtenidos por metrología convencional así como el apoyo visual del sistema. Teniendo como resultado de esta mezcla de técnicas datos muy precisos acerca del principio tecnológico del sistema con miras al rediseño del mismo.

Como resultado de la ingeniería inversa del sistema es importante mencionar que se realiza el rediseño, y no copia, del sistema de roloformado utilizado en líneas de producción de la empresa, el modelo resultante se puede observar en la figura 3.6 y de igual manera se presentan en la tabla 5 las diferencias significativas entre dichos modelos, corroborando así que se realizó un rediseño del sistema y no una copia de él.

6.4 Caracterización de Materiales

La caracterización de materiales se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas.

En el punto 4.3 se presentó una metodología para la caracterización de materiales, dicha metodología fue realizada en base a los datos que serían proporcionados por la empresa, siendo poco suficientes para obtener una caracterización en su totalidad, ya que como se mencionó a lo largo del trabajo en algunas partes del sistema fue prácticamente imposible obtener muestras físicas de ellas, por lo que sólo se proporcionaron datos de dureza y algunas fichas técnicas de los materiales utilizados, por lo que se recurrió a la ayuda de bases de datos digitales [19] y a handbooks [28] que contienen datos específicos sobre los materiales incluyendo aplicaciones de ellos.

Gracias a los microanálisis realizados a las pocas muestras obtenidas de los materiales fue posible realizar investigaciones detalladas en las bases de datos mencionadas para así concluir que tipo de materiales fueron utilizados. De igual manera en otros casos en donde solo se contaba con durezas y aplicaciones se recurrió al mismo método para predecir el material.

Se ha reportado que el uso de las bases de datos digitales [19] es de gran ayuda para la caracterización de materiales, pues cuenta con un repertorio muy amplio de materiales utilizados para la manufactura de productos. De igual manera en los handbooks [28] se encuentra una gran cantidad de información muy útil para la correcta caracterización de materiales. Con la ayuda de herramientas de este tipo, en el presente trabajo se comprobó que la caracterización de materiales con los que se cuenta con pocas muestras o ninguna muestra y pocos datos, es posible realizarla con ayuda de las herramientas mencionadas anteriormente.

6.5 Selección de Materiales

Recapitulando lo mencionado en el capítulo 5 del presente trabajo, se sabe que diversos autores [17, 29-36] presentan metodologías para la selección de materiales. En base a esto se propuso una metodología que se acoplara al proceso de selección requerido en el presente trabajo.

Dicha metodología se observa en la figura 5.1, obteniendo como resultados de dicha estrategia los materiales seleccionados que se muestran en la tabla 14. En base a éstos materiales seleccionados se evalúan los siguientes puntos:

- Reducción de costos del sistema.
- Reducción del peso total del sistema.
- Manufactura local del sistema.

6.5.1 Comparación de costos del sistema actual contra el prototipo del sistema.

En el capítulo 5 se realizó una selección de materiales con respecto a los resultados obtenidos en el capítulo 4 de los materiales con los cuales se encuentra fabricado el sistema actual, en la tabla 15 se realiza una comparación de costos entre los materiales utilizados y los que conforman al sistema actual:

Tabla 15. Comparación de costos entre materiales seleccionados y materiales actuales (costos aproximados según CES Edupack).

<i>Material Actual</i>	<i>Costo Aprox.(USD/kg)</i>	<i>Material Seleccionado</i>	<i>Costo Aprox. (USD/kg)</i>
Fundición de hierro gris de grado 220	0.509 - 0.5467	Fundición de hierro gris de grado 100	0.1885 - 0.3016
Aceros de la serie 5100	0.4713 – 0.8483	Acero 4140	0.4713 – 0.8483
Aceros de la serie 4600	0.754 – 1.225	Acero 8620	0.5655 – 1.037
Acero H13	5.655 – 9.426	Acero D2	3.77 – 7.54
Aceros de la serie 8600	0.5655 – 1.037	Acero 8620	0.5655 – 1.037

NOTA: Las celdas marcadas en verde implican menores costos, las celdas marcadas en rojo implican mayores costos, las celdas marcadas en amarillo denotan costos iguales.

Los costos de los materiales a utilizar son un 34% menor a los utilizados en el sistema actual. Se ha reportado que alrededor del 70% del costo de un producto es debido al material en bruto y debido a cada una de las partes del producto [37]. En base a esto es clara la reducción del costo de los materiales a utilizar en el sistema, siendo el porcentaje de reducción de costo de material de gran impacto sobre el costo total del sistema, el cual a su vez tendrá un impacto sobre el costo total del producto.

La reducción de costos no sólo implica reducir el costo de cada uno de los materiales del sistema, sino también el mantenimiento, la complejidad de la línea, configuración de la línea entre algunos otros puntos [38]. Anteriormente se mencionó que la empresa mediante estudios internos realizados, se determinó que el costo de mantenimiento del sistema era muy elevado, esto al ser realizado por técnicos extranjeros y no por personas dentro de la planta, por lo que al eliminar el factor de contar con un sistema de origen extranjero, se espera que próximamente que la empresa realice el mismo tipo de estudios sobre el prototipo el costo por mantenimiento sea reducido considerablemente. Así mismo, al realizar el rediseño para lograr un sistema de roloformado flexible se pretende disminuir la complejidad de la línea, pues actualmente al cambiar el producto deseado en el sistema de roloformado, es necesario cambiar el sistema y sustituirlo por otro que cumpla con los requerimientos del producto, se espera con el nuevo sistema eliminar tiempos muertos y el realizar estos cambios, teniendo esto gran impacto sobre el costo del producto. Siendo estos los puntos a analizar por la empresa, esperando contar con una reducción de costos considerable en comparación al sistema anterior.

6.5.2 Comparación de las propiedades mecánicas y densidades de los materiales actuales contra los que serán utilizados.

Para conocer si realmente existirá una reducción de peso en el prototipo a fabricar, se realiza una comparación entre las densidades de los materiales del sistema actual contra los materiales seleccionados para el prototipo, ésta comparación se presenta en la tabla 16.

Tabla 16. Comparación entre densidades de los materiales del sistema actual y los seleccionados para el prototipo (datos tomados de CES Edupack).

<i>Material Actual</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Material Seleccionado</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>
Fundición de hierro gris de grado 220	7100 - 7200	Fundición de hierro gris de grado 100	6900 - 7100
Aceros de la serie 5100	7800 - 7900	Acero 4140	7800 - 7900
Aceros de la serie 4600	7800 - 7900	Acero 8620	7800 - 7900
Acero H13	7690 - 7840	Acero D2	7620 - 7780
Aceros de la serie 8600	7800 - 7900	Acero 8620	7800 - 7900

NOTA: Las celdas marcadas en verde implican densidades menores, las celdas marcadas en rojo implican densidades mayores, las celdas marcadas en amarillo denotan densidades semejantes.

Al analizar los resultados obtenidos en la tabla 16, los pesos del sistema son reducidos en un 3%, pero ahora, es posible que la reducción de peso y la selección de materiales sea un factor negativo para la durabilidad del sistema. A continuación se realiza una comparación de las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales utilizados para el prototipo con los materiales con los que cuenta el sistema actual, con el objetivo de descartar que lo anterior sea un factor negativo durante el funcionamiento del sistema, dicha comparación se presenta en la tabla 17.

Al analizar las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales mencionados en la tabla 17, en promedio se mejoran 2 propiedades por material seleccionado, se mantienen 1.5 propiedades por material seleccionado y se reducen 1.5 propiedades del material seleccionado, en base a esto existe una mejora en cuanto a las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados en el capítulo 5. Esto demuestra que la reducción de peso y de costo no afecta negativamente sobre los materiales seleccionados para la manufactura del prototipo del sistema.

Tabla 17. Comparación de propiedades mecánicas (datos tomados de CES Edupack).

Material Actual	Propiedad Mecánica		Material Seleccionado	Propiedad Mecánica	
<i>Fundición de hierro gris de grado 220</i>	Dureza (HV)	132 - 285	<i>Fundición de hierro gris de grado 100</i>	Dureza (HV)	90 - 216
	Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	17 - 21		Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	20 - 24
	Límite elástico (MPa)	143 - 163		Límite elástico (MPa)	65 - 98
	Resistencia a la Tensión (MPa)	220 - 250		Resistencia a la Tensión (MPa)	100 - 150
	Esfuerzo cortante (GPa)	42 - 51		Esfuerzo cortante (GPa)	31 - 40
	Factor de Forma	24		Factor de Forma	25
<i>Aceros de la serie 5100</i>	Dureza (HV)	355 - 315	<i>Acero 4140</i>	Dureza (HV)	210 - 260
	Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	44 - 75		Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	50 - 80
	Límite elástico (MPa)	770 - 955		Límite elástico (MPa)	326 - 379
	Resistencia a la Tensión (MPa)	900 - 1100		Resistencia a la Tensión (MPa)	680 - 840
	Esfuerzo cortante (GPa)	80 - 85		Esfuerzo cortante (GPa)	80 - 85
	Factor de Forma	29		Factor de Forma	39
<i>Aceros de la serie 4600</i>	Dureza (HV)	160 - 200	<i>Acero 8620</i>	Dureza (HV)	170 - 210
	Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	75 - 122		Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	86 - 137
	Límite elástico (MPa)	268 - 312		Límite elástico (MPa)	320 - 400
	Resistencia a la Tensión (MPa)	515 - 635		Resistencia a la Tensión (MPa)	570 - 700
	Esfuerzo cortante (GPa)	77 - 83		Esfuerzo cortante (GPa)	77 - 83
	Factor de Forma	56		Factor de Forma	57
<i>Acero H13</i>	Dureza (HV)	380 - 580	<i>Acero D2</i>	Dureza (HV)	580 - 640
	Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	23.2 - 24.1		Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	18.3 - 21.5
	Límite elástico (MPa)	1609 - 1691		Límite elástico (MPa)	1864 - 2289
	Resistencia a la Tensión (MPa)	1940 - 2040		Resistencia a la Tensión (MPa)	2100 - 2502
	Esfuerzo cortante (GPa)	82 - 86		Esfuerzo cortante (GPa)	79 - 84
	Factor de Forma	15		Factor de Forma	11
<i>Aceros de la serie 8600</i>	Dureza (HV)	170 - 210	<i>Acero 8620</i>	Dureza (HV)	170 - 210
	Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	86 - 137		Resistencia a la fractura (MPa*m ^{1/2})	86 - 137
	Límite elástico (MPa)	320 - 400		Límite elástico (MPa)	320 - 400
	Resistencia a la Tensión (MPa)	570 - 700		Resistencia a la Tensión (MPa)	570 - 700
	Esfuerzo cortante (GPa)	77 - 83		Esfuerzo cortante (GPa)	77 - 83
	Factor de Forma	57		Factor de Forma	57

NOTA: Las celdas marcadas en verde implican mejores propiedades, las celdas marcadas en rojo implican deficiencia en las propiedades, las celdas marcadas en amarillo denotan propiedades semejantes.

6.5.3 Manufactura del prototipo del sistema

Actualmente la manufactura del sistema se realiza en Alemania. Como se mencionó anteriormente los costos de mantenimiento es un punto a considerar para la reducción de costos [38], debido a que el sistema es de procedencia extranjera el costo por mantenimiento del sistema es elevado puesto que se realiza por técnicos especializados enviados directamente desde el país de origen, esto se refleja en los costos del producto final. Es crucial que el mantenimiento de dicho sistema sea en el país en dónde se encuentra instalado, según investigaciones realizadas dentro de los departamentos de la empresa, se indica que al realizar los mantenimientos al sistema con técnicos especializados propios de ella se reduciría en un 50% el costo del producto final, siendo éste un producto más competitivo dentro del mercado.

Un punto muy importante para lograr los objetivos planteados es seleccionar los materiales de tal manera que éstos sean de proveedores locales (sin importar el país en donde se encuentre el sistema), esto fue posible lograrlo al establecer como restricción principal durante la selección de materiales, el considerar la abundancia de dicho material en el mercado mundial.

En la literatura se encuentran numerosas metodologías para la selección de proveedores, siendo todas ellas capaces de manipular una gran cantidad de factores cuantitativos y cualitativos. Se ha observado que el criterio de precio más bajo no es el mecanismo de selección más utilizado, en cambio el criterio de selección más popular es evaluando el desempeño del proveedor, la calidad de sus productos, forma de envío, precio y lugar de establecimiento de él. Esto prueba que el criterio tradicional no es suficientemente robusto para cumplir con las especificaciones actuales de los consumidores al no garantizar calidad, flexibilidad entre otros [39].

Con lo mencionado anteriormente la empresa realizó un análisis de mercado para establecer el proveedor de los materiales a utilizar dentro del sistema. A continuación en la tabla 18, se enuncia el proveedor (ubicado en la Ciudad de Monterrey) de cada uno de los materiales utilizados.

Tabla 18. Proveedores de los materiales utilizados para la fabricación del prototipo del sistema.

<i>Material Seleccionado</i>	<i>Proveedor</i>
Fundición de hierro gris de grado 100	Aceros Levinson
Acero AISI 4140	Aceros Levinson
Acero AISI 8620	Aceros Levinson
Acero AISI D2	Aceros Levinson

La ventaja de contar con proveedores que se encuentren cerca del lugar de fabricación del sistema y del lugar de puesta en marcha del sistema es la rapidez de transportación y la reducción significativa en el costo total del material a adquirir.

Una vez seleccionados los proveedores del material a utilizar, la empresa utilizó la misma metodología para la manufactura del prototipo del sistema de roloformado, tomando en cuenta los mismos puntos planteados durante la selección del proveedor.

Con lo anterior se seleccionó al proveedor que manufacturó el sistema y se comenzó con la fabricación de dicho prototipo. El proceso de fabricación del sistema tuvo una duración de 2 meses continuos de trabajo del proveedor. El resultado de dicha fabricación se aprecia en la figura 6.1. El prototipo de dicho sistema resultó ser totalmente funcional pues como se puede apreciar en la figura 6.1 fue instalado dentro de la línea de roloformado y puesto en marcha en diferentes líneas de producción.



Figura 6.1 Prototipo funcional del Sistema puesto en línea en distintas vistas.

La empresa realizó pruebas de funcionamiento durante 2 meses sin tener ningún problema con el prototipo, los resultados arrojados por la empresa nos indican que el desempeño del equipo fue superior al esperado. Un ejemplo de ello es: el prototipo se puso en funcionamiento en diferentes líneas de producción, siendo el único componente que no se reemplaza durante el cambio de producto, el desempeño esperado fue superado en su totalidad, ya que resultó ser más flexible de lo esperado. Según la empresa el prototipo cumplió con los requerimientos de cada uno de los procesos a los cuales se sometió.

Con el prototipo puesto en marcha, y con distintas pruebas realizadas por la empresa, se ha decidido comenzar a fabricar más de estas torres del sistema, puesto que es posible lograr mayor flexibilidad en la línea de producción. Conforme avance la producción de las torres del sistema se espera que se obtengan mejores resultados en el desempeño del sistema, al ir homogenizando la línea de producción de la planta.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo a Futuro

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se propusieron y describieron diversas tareas, mediante las cuales con una metodología estructurada, se logró la fabricación de un sistema versátil, económico y cuya manufactura es simple.

Para una correcta obtención de los datos tridimensionales involucrados en el sistema, se desarrolló una metodología la cual permitió la digitalización de sistemas complejos, de igual manera dicha metodología planteada contó con gran versatilidad al digitalizar otro tipo de objetos, ya que el resultado obtenido de las digitalizaciones con dicha metodología fueron rápidos y de gran precisión.

Para lograr un rediseño de un sistema de ésta índole, se efectuó el proceso sugerido para la realización de la ingeniería inversa del sistema. El resultado de la ingeniería inversa fue un modelo totalmente paramétrico, el cual permite realizar diversas modificaciones futuras sobre el modelo original sin ningún problema, aumentando así la flexibilidad del modelo rediseñado.

A pesar de las problemáticas presentadas para la obtención de muestras del sistema, se propuso una metodología para la caracterización de materiales. Siguiendo dicha metodología y utilizando diversas herramientas de apoyo fue posible realizar la caracterización de materiales de manera exitosa. La caracterización de materiales realizada, permitió obtener un costo aproximado de la fabricación de las torres del sistema de roloformado, así como también comenzar con una selección de materiales para la fabricación del prototipo.

Con la metodología planteada para la selección de materiales y con los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales, se realizó una selección de materiales la cual resultó ser adecuada para el sistema en desarrollo. Con dicha selección de materiales se redujeron diversos puntos tales como: reducción de costos, reducción de peso, fácil acceso a los materiales, manufactura económica de los materiales, y por último la reducción del tiempo de mantenimiento y de instalación.

Con el desarrollo de lo anterior, fue posible fabricar un prototipo totalmente funcional, el cual fue sometido a pruebas dentro de la línea de producción. Los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas fueron exitosos, puesto que el sistema no presentó ningún tipo de falla, el tiempo de instalación del sistema fue más rápido y el mantenimiento realizado a él fue de manera más sencilla y rápida.

Con lo obtenido anteriormente es posible observar que se desarrolló un sistema flexible, económico, fácil de manufacturar, sencillo de instalar y que cumple con las demandas a las cuales son sometidas este tipo de sistemas.

Se logró generar conocimientos sobre el desarrollo de éstos sistemas multidisciplinarios, ya que se logró la fabricación de un sistema de roloformado flexible con ayuda del desarrollo de diversas disciplinas; tanto por disciplinas con un amplio recorrido en el mundo ingenieril, como lo son la selección de materiales y la caracterización de materiales, así como el uso de nuevas tecnologías, como lo es la ingeniería inversa.

7.2 Trabajo a Futuro

El método utilizado para realizar la ingeniería inversa, es capaz de realizar un diseño paramétrico, el cual permite que dicho sistema se pueda modificar en su totalidad según las necesidades que se vayan presentando, de igual manera un diseño paramétrico de ésta índole permite que se pueda realizar una simulación del sistema de roloformado y optimizarlo, permitiendo así obtener resultados más concretos en cuanto a la flexibilidad del sistema, e inclusive es posible comenzar a proponer y simular líneas de roloformado flexibles.

Con lo mencionado anteriormente es posible realizar cambios al diseño de las torres del sistema de roloformado, esto con el objetivo de desarrollar una nueva línea de roloformado la cuál tenga la capacidad de fabricar diferentes tipos de productos dentro de la misma línea, sin la necesidad de realizar el cambio de herramientas.

Al contar con un prototipo puesto en línea del sistema, será posible contar con torres de roloformado las cuales no estén en funcionamiento y de ésta manera permitan la obtención de muestras, para así realizar una caracterización de materiales más detallada y contar con datos más precisos acerca de ellos. Como consecuencia a esto, la selección de materiales contará con fundamentos más sólidos.

Referencias

- [1] Halmos, George T., Roll Forming Handbook, CRC Press, 2005. ISBN 0824795636
- [2] Somin Hellborg, January 2007, Finite Element Simulation of Roll Forming, Master Thesis, Institute of Technology Linköping University.
- [3] S.J. Yoon, D.Y. Yang, Development of a Highly Flexible Incremental Roll Forming Process for the Manufacture of a Doubly Curved Sheet Metal, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 1, 2003, Pages 201-204, ISSN 0007-8506, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60565-4.
- [4] Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes, Reverse Engineering an Industrial Perspective, Springer, 2008. ISBN 978-1-84628-855-5
- [5] Liang-Chia Chen, Grier C. I. Lin, Reverse engineering in the design of turbine blades - a case study in applying the MAMDP, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 16, Issues 2-3, April 2000, Pages 161-167, ISSN 0736-5845, DOI: 10.1016/S0736-5845(99)00044-7.
- [6] Eyup Bagci, Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies, Advances in Engineering Software, Volume 40, Issue 6, June 2009, Pages 407-418, ISSN 0965-9978, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2008.07.003.

- [7] Willem Waegeman, Johannes Cottyn, Bart Wyns, Luc Boullart, Bernard De Baets, Lieva Van Langenhove, Jan Detand, Classifying carpets based on laser scanner data, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 21, Issue 6, September 2008, Pages 907-918, ISSN 0952-1976, DOI: 10.1016/j.engappai.2007.07.010.
- [8] Yan-Ping Lin, Cheng-Tao Wang, Ke-Rong Dai, Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint, *Medical Engineering & Physics*, Volume 27, Issue 2, March 2005, Pages 189-193, ISSN 1350-4533, DOI: 10.1016/j.medengphy.2004.09.006.
- [9] Kumi Kodaka, Yasushi Nishii, Yuta Sakurai, Kunihiro Nojima, Kenji Sueishi, Crown inclination measured by laser scanner, *Orthodontic Waves*, Volume 69, Issue 1, March 2010, Pages 8-12, ISSN 1344-0241, DOI: 10.1016/j.odw.2009.06.002.
- [10] Yuta Sakurai, Yasushi Nishii, Kumi Kodaka, Kunihiro Nojima, Kenji Sueishi, Crown angulation measured by laser scanner, *Orthodontic Waves*, Volume 69, Issue 1, March 2010, Pages 13-17, ISSN 1344-0241, DOI: 10.1016/j.odw.2009.06.003.
- [11] Matteo Belvedere, Gareth Dyke, Majid Hadri, Shinobu Ishigaki, The oldest evidence for birds in Northern Gondwana? Small tridactyl footprints from the Middle Jurassic of Msemrir (Morocco), *Gondwana Research*, Volume 19, Issue 2, March 2011, Pages 542-549, ISSN 1342-937X, DOI: 10.1016/j.gr.2010.08.004.
- [12] Luc Schueremans, Bjorn Van Genechten, The use of 3D-laser scanning in assessing the safety of masonry vaults--A case study on the church of Saint-Jacobs, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 47, Issues 3-4, Optical Measurements, March-April 2009, Pages 329-335, ISSN 0143-8166, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2008.06.009.
- [13] Basilio Ramos Barbero, Elena Santos Ureta, Comparative study of different digitization techniques and their accuracy, *Computer-Aided Design*, Volume 43, Issue 2, February 2011, Pages 188-206, ISSN 0010-4485, DOI: 10.1016/j.cad.2010.11.005.

- [14] A. W. L. Yao, Applications of 3D scanning and Reverse Engineering techniques for quality control of quick response products, *The International Journal of Advances Manufacturing Technology*, Volume 26, November 2005, Numbers 11-12, Pages 1284-1288, DOI: 10.1007/s00170-004-2116-5.
- [15] Chia-Lung Chang, Yen-Hung Chen, Weld contour measurement of fillet welds by the reverse engineering technique, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 27, Issue 1, January 2008, Pages 1-6, ISSN 0278-6125, DOI: 10.1016/j.jmsy.2008.06.002.
- [16] Giovanna Sansoni, Franco Docchio, Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 20, Issue 5, October 2004, Pages 359-367, ISSN 0736-5845, DOI: 10.1016/j.rcim.2004.03.001.
- [17] M. F. Ashby, Y. J. M. Brechet, D. Cebon, L. Salvo, Selection strategies for materials and processes, *Materials & Design*, Volume 25, Issue 1, February 2004, Pages 51-67, ISSN 0261-3069, DOI: 10.1016/S0261-3069(03)00159-6.
- [18] M.F. Ashby, Multi-objective optimization in material design and selection, *Acta Materialia*, Column 48, Issue 1, 1 January 2000, Pages 359-369, ISSN 1359-6454, DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00304-3.
- [19] P. S. Ramalhete, A. M. R. Senos, C. Aguiar, Digital tools for material selection in product design, *Materials & Design*, Volume 31, Issue 5, May 2010, Pages 2275-2287, ISSN 0261-3069, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.013.
- [20] S. Motavalli, R. Shamsaasef, Object-oriented modelling of a feature-based reverse engineering system, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Volume 9, Number 5, September 1996, Pages 354-368.
- [21] Robert J. Abella, James M. Daschbach, Roger J. McNichols, Reverse engineering industrial applications, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 26, Issue 2, April 1994, Pages 381-385, ISSN 0360-8352, DOI: 10.1016/0360-8352(94)90071-X.

- [22] Yau, H.T., Haque, S., Menq, C.H. (1995): Reverse engineering in the design of engine intake and exhaust ports. *Manuf Sci Eng*, 64: 139-148.
- [23] Reverse engineering and computational fluid dynamics help british cycling team sprint to Olympic medals, *Case Studies Geomagic*, www.geomagic.com
- [24] Cramblitt, Bob, New treatment from shirners hospital uses Geomagic Studio to bring smiles to babies' faces, *Case Studies Geomagic*, www.geomagic.com.
- [25] Geomagic helps ensure NASA shuttle safety, July 2006, *Case Studies Geomagic*, www.geomagic.com.
- [26] Chader M., The value of 3rd Generation, *Parametric Modeling from 3D Scan Data*, SME conference Rapid 2008 proceedings, 2008.
- [27] Arámbula González Karenina, Evaluation of Technologies for dimensional/geometrical and surface metrology of sculptures surfaces, *Master Degree Thesis*, August 2010.
- [28] ASM. *ASM handbook. Metallography and Microstructures*. Metals Park, Ohio, USA; ASM International.
- [29] Dieter GE. *Engineering design, a materials and processing approach*. 4th edition, New York, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [30] Charles JA, Crane FAA, Furness JAG. *Selection and use of engineering materials*. 3rd edition, UK: Butterworth Heinemann Oxford, 1997.
- [31] Farag MM. *Selection of materials and manufacturing processes for engineering design*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1990.
- [32] Lewis G. *Selection of engineering materials*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1990.
- [33] Ashby MF. *Material selection in mechanical design*. 4th edition, Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2010.

- [34] Ashby MF, Cebon D. Case studies in materials selection. Cambridge, UK: Granta Design Ltd, 1999.
- [35] Bréchet Y, Ashby MF, Salvo L. Sélection des Matériaux et des Procédés de Mise en Oeuvre. Switzerland: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes de Lausanne, 2001. (Volume 20 of the Series Traité des Matériaux).
- [36] ASM. ASM handbook. Materials selection and design. Metals Park, Ohio, USA: ASM International.
- [37] Ezgi Aktar Demirta, Ozden Ustun, An integrated multiobjective decision making process for supplier selection and order allocation, Omega, Volume 36, Issue 1, Special Issue Section: Papers presented at the INFORMS conference, Atlanta, 2003, February 2008, Pages 76-90, ISSN 0305-0483, DOI: 10.1016/j.omega.2005.11.003.
- [38] Brag Steven M., Cost reduction analysis: Tools and Strategies, Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, 2010.
- [39] William Ho, Xiaowei Xu, Prasanta K. Dey, Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review, European Journal of Operational Research, Volume 202, Issue 1, 1 April 2010, Pages 16-24, ISSN 0377-2217, DOI: 10.1016/j.ejor.2009.05.009.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del Digitalizador Range 7 de Konica Minolta.	26
Tabla 2. Listado de componentes identificados en el desensamble.	29
Tabla 3. Especificaciones de Range Viewer.	34
Tabla 4. Listado de componentes con datos adquiridos desde el digitalizador.	35
Tabla 5. Diferencias entre modelos.	44
Tabla 6. Porcentaje de los elementos que componen al material que se analiza.	51
Tabla 7. Porcentaje de los elementos que componen al material que se analiza.	57
Tabla 8. Material de Fabricación de las distintas partes del sistema.	57
Tabla 9. Componentes a fabricar.	63
Tabla 10. Definición de material base de cada uno de los componentes.	66
Tabla 11. Dureza de cada uno de los componentes.	67
Tabla 12. Función, restricciones, objetivos y variables libres para cada uno de los componentes.	68
Tabla 13. Posibles candidatos para cada uno de los componentes.	71
Tabla 14. Materiales definitivos para cada uno de los componentes.	73
Tabla 15. Comparación de costos entre materiales seleccionados y materiales actuales.	80
Tabla 16. Comparación entre densidades de los materiales del sistema actual y los seleccionados para el prototipo.	82
Tabla 17. Comparación de propiedades mecánicas	83
Tabla 18. Proveedores de los materiales utilizados para la fabricación del prototipo del sistema.	85

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Objetivos del presente trabajo.	4
Figura 1.2 Esquema de la metodología del trabajo.	7
Figura 2.1 Máquina de Medición por Coordenadas.	11
Figura 2.2 a) Konica Minolta Range 7, b) Spatium FMM 3D.	12
Figura 2.3 Progreso de la Medición Dimensional.	12
Figura 2.4 a) Pieza a Digitalizar, b) Nube de puntos de la pieza, c) Principio de funcionamiento de la técnica llamada tomografía computacional.	13
Figura 2.5 Proceso de la Ingeniería Inversa.	14
Figura 2.6 Palpador de contacto digitalizando una pieza.	17
Figura 2.7 Digitalizando un automóvil mediante luz blanca.	18
Figura 2.8 Caras verticales; palpador vs laser.	19
Figura 3.1 Metodología de Trabajo para la Digitalización.	23
Figura 3.2 Castillo de Roloformado.	24
Figura 3.3 Konica Minolta Range 7.	25
Figura 3.4 Configuración del Sistema a Utilizar.	27
Figura 3.5 Desensamble realizado en planta.	29
Figura 3.6 Ensamble en Solidworks del castillo de Roloformado.	43
Figura 4.1 Microscopio Electrónico de Barrido.	47
Figura 4.2 Unidad de detección EDAX-EDS.	47
Figura 4.3 Metodología utilizada para la Caracterización de Materiales.	48
Figura 4.4 a) Muestra de block, b) Rebaba de block.	49
Figura 4.5 Metalografías en diferentes posiciones del material a diferentes magnificaciones.	50
Figura 4.6 Hierro gris con hojuelas de grafito distribuidas uniformemente con direcciones aleatorias a 105x.	51
Figura 4.7 a) Composición del material a buscar, b) Resultado de la búsqueda en base a la composición.	52
Figura 4.8 Rebaba de la flecha.	56
Figura 4.9 Micrografías realizadas en diferentes lugares de la muestra.	56
Figura 5.1 Estrategia para la selección de materiales.	60
Figura 6.1 Prototipo funcional del Sistema puesto en línea en distintas vistas.	86