



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO PARA ENSAMBLE DE MANO PROTÉSICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ADRIANA ITZEL HERNÁNDEZ CONTRERAS

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. 14 DE AGOSTO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Borja Ramírez Vicente
Secretario: Dr. Espinosa Bautista Adrián
Vocal: Dr. Ayala Ruíz Álvaro
1 er. Suplente: M.I. Flores Luna Rosa Itzel
2 do. Suplente: Dr. Dorador González Jesús Manuel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Centro de Ingeniería Avanzada.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Manuel Dorador González

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi pareja Juan Gustavo por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas, por toda su ayuda y apoyo lo largo de esta etapa y sobre todo por todo el amor brindado.

A mis padres Héctor y Rosa quienes suponen los cimientos de mi desarrollo, que han destinado tiempo y esfuerzo para enseñarme cosas nuevas con amor y cariño.

A mis hermanos Jimena, Octavio, Víctor y Lizbeth por brindarme siempre su apoyo así como momentos de alegría y sonrisas.

A mi asesor Dr. Jesús Manuel Dorador González quien siempre me brindo todo su apoyo, ayuda y conocimientos incondicionalmente.

A mi jurado M.I Itzel Flores, Dr. Adrián Espinosa, Dr. Vicente Borja y al Dr. Álvaro Ayala por todo su apoyo.

Al Centro de Ingeniería Avanzada y en general a todas las personas que de alguna forma contribuyeron a que este proyecto se realizara

Esta tesis se desarrolló en el marco de los proyectos PAPIIT IT101915 "Mecatrónica en los sistemas biomédicos" y PAPIME PE102915 "Diseño para ensamble y manufactura"

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1 Problema y motivación, objetivos, alcances, metodología y alcances 8	
Problemática y motivación	
Problemática y motivación	9
Objetivos	10
Metodología	10
Alcances	10
CAPÍTULO 2 Marco teórico	
2.1 Antecedentes	12
2.2 Estado actual del método	16
2.3 Mano CDMIT	17
2.4 Método Boothroyd	21
2.5 Diseño para ensamble manual	21
2.6 Criterios de diseño	25
CAPÍTULO 3 Pasos para ensamble (CDMIT), Aplicación y Análisis de resultados	
3.1 Piezas y sub ensamblajes	31
3.2 Pasos para ensamble (CDMIT)	33
3.3 Tabla de análisis de ensamble manual (CDMIT)	35
3.4 Análisis de resultados	36
CAPÍTULO 4 Propuestas para rediseño, Pasos para ensamble (Rediseño) y Segundo cálculo de tiempos de ensamble	
4.1 Propuestas para rediseño	40
4.2 Pasos para ensamble (Rediseño)	44
4.3 Segundo cálculo de tiempos de ensamble (Rediseño)	46
4.4 Tabla de análisis de ensamble manual (Rediseño)	48
CAPÍTULO 5 Cálculo de Snap-Fit, Modelado en CAD y Posiciones para sujeción de objetos.	
5.1 Criterios de cálculo de Snap-Fit	50
5.2 Propuesta análisis para Snap-Fit tipo pin	52
5.3 Propuesta cálculo de Snap-Fit Tapa	53
5.4 Propuesta cálculo de Snap-Fit Soportes	55
5.5 Modelado en CAD	57
5.6 Posiciones para sujeción de objetos	65
CAPÍTULO 6 Conclusiones y trabajo a futuro	
Conclusión	61
Trabajo a Futuro	72
Anexos	73
Referencias	74

INTRODUCCIÓN

Para la generación de un producto final que pueda ser comercializado, es necesario llevar a cabo un proceso que puede resultar complicado ya que involucra un gran número de personas, siendo estas personas expertas en cierto tipo de áreas principalmente ingenieril y administrativas.

Este proceso consta de al menos cuatro pasos importantes; propuesta de proyecto, que puede ser generada por cualquier tipo de persona que cuente con una idea novedosa; diseño, esta parte es en donde, generalmente, los ingenieros diseñadores se encargan de dar vida a la idea por medio de bosquejos y simulaciones computacionales que permiten visualizar el producto, así como para realizar una serie de pruebas matemáticas que demuestren que éste funcionará para lo que se ha diseñado.

Cuando el diseño demuestra que el producto será funcional, es decir, llevará a cabo el trabajo para el que se ha creado, es cuando éste puede ser manufacturado para poder llevarlo del papel a su forma física final, este proceso es llevado a cabo por técnicos e ingenieros, finalmente el producto puede ser comercializado.

Idealmente estos son los pasos a seguir para la materialización del producto, sin embargo, existen procesos intermedios que permiten reducir costos de producción y la complejidad de ésta transformación, como lo son el diseño basado en el usuario.

Estos pasos son el diseño para ensamble (y desensamble) y el diseño para manufactura, ambos procesos son análisis que se llevan a cabo en el momento del diseño del producto, resultan de gran importancia ya que, en el caso del diseño para ensamble, puede hacer que el producto pase de una gran cantidad de piezas a sólo unas cuantas y, en el caso de la manufactura, impide que se lleve a cabo un proceso de manufactura erróneo o que resulte más costoso de fabricar.

Existen una serie de métodos para analizar el ensamble de un producto, generalmente estos métodos, se basan en brindar al diseñador puntos de alerta o errores que se pueden generar al realizar un ensamble tal como el método de Lucas que se basa en la acumulación de penalizaciones (Leaney, 1990), sin embargo, el método que usan empresas y escuelas de gran renombre como Motorola, SouthCo, Embry-Riddle Aeronautical University, Dell (DFMA, 2015), entre otras, es el método de Boothroyd Dewhurst, el cual será aplicado en este trabajo.

Las principales ventajas que brinda el usar el método de Boothroyd yacen en la estimación del tiempo de ensamble y estimar la eficiencia del diseño respecto al mejor tiempo posible. Además, con esta información, se pueden detectar las piezas y los pasos que consumen más tiempo y señalarlas como puntos de mejora. Esto hace que el método sea muy atractivo y eficiente.

Esta tesis se enfoca principalmente en el diseño para ensamble y desensamble de un producto, teniendo como caso de estudio la mano protésica CDMIT. La selección de este caso de estudio se debe principalmente a las siguientes razones: se cuenta con el prototipo final, planos, modelos computacionales, documentación, pruebas realizadas y principalmente fácil acceso a los diseñadores.

El trabajo que se llevará a cabo en esta tesis será únicamente la aplicación del método de análisis para ensamble de la mano protésica CDMIT, en este trabajo no se realizarán cambios en la funcionalidad original de la mano, el diseño original tiene un peso de 400 gr aproximadamente con motores y el peso límite sugerido es de 800 gr, también será conservada esta restricción en este trabajo (Flores, 2007).

En resumen en el capítulo 1 se establecerá el problema, motivación, objetivos, alcances, metodología y antecedentes; en el capítulo 2 se hablará sobre el marco teórico, los antecedentes y trabajo previo de la mano CDMIT así como una descripción del método a utilizar. En el capítulo 3 empieza el desarrollo del trabajo, en este capítulo se muestran las piezas que componen la mano así como una serie de pasos a seguir para su ensamble, se realiza el primer análisis de ensamble y son analizados los resultados. En el capítulo 4 se dan propuestas de rediseño para alcanzar los objetivos planteados, se proponen los nuevos pasos de ensamble y se realiza el segundo análisis. En el capítulo 5, se muestran los cálculos matemáticos necesarios para el rediseño y el modelado de sólidos y por último el capítulo 6 se tiene la conclusión y trabajo a futuro.

Diseño para ensamble de mano protésica

Capítulo 1. Problema y motivación, objetivos, alcances, metodología y alcances

PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN

Este trabajo aborda un problema de carácter de diseño, la operación de ensamble de una mano protésica, se realiza una evaluación de esta operación y se busca aumentar la eficiencia de ensamble con lo que podría reducir costos en una futura producción.

Los problemas que surgieron al ensamblar la mano y ponerla en operación fueron notables, esto dio pie a los diseñadores del diseño original a proponer una serie de recomendaciones para posteriores versiones (Flores, 2007).

Las recomendaciones propuestas en la tesis son dos, la primera es sustituir los pernos que unen los eslabones del mecanismo por uniones que ya se encuentren integradas en éstos y la segunda es agregar un ángulo de 8 grados aproximadamente entre cada uno de los dedos (Flores, 2007)

Otra problemática establecida con pláticas con los diseñadores de este diseño original es el acomodo de los motores, ya que estos se encuentran traslapados unos con otros.

La mano protésica con la que se trabajará es la mano CDMIT (Flores, 2007) la cual, hasta el momento, sólo tiene un análisis de ensamble manual y automático hecho en un trabajo de tesis de licenciatura (Hernández, 2013), sin embargo, este trabajo se considera incompleto debido a que no se tomaron en cuenta factores importantes como es el de la proposición de pasos para su ensamble y el análisis por subensambles, es por esa razón que es necesario establecerlos antes de realizar una evaluación del mismo.

OBJETIVO

Realizar el análisis de diseño para ensamble manual de la carcasa así como de los componentes dentro de ella, por medio del método Boothroyd – Dewhurst, de la mano protésica CDMIT, una vez realizado, generar un rediseño el cual disminuya los tiempos de operación y aumente la eficiencia de diseño.

- Proponer pasos de ensamble para el diseño original de la mano.
- Reducir el tiempo de ensamble total un 50% del obtenido de la prótesis original.
- Aumentar la eficiencia de ensamble a, al menos, un 25%.
- Reducir el número de piezas al menos un 30%.

METODOLOGÍA

Se utilizará el método de Boothroyd-Dewhurst para:

- Analizar los tiempos de ensamble de la mano protésica y la eficiencia de su diseño.
- Detectar áreas de mejora.
- De manera iterativa, proponer diferentes configuraciones para el ensamble, evaluarlas y seleccionar una que mejore los tiempos de ensamble y la eficiencia de diseño.

ALCANCES

- Análisis del estado actual de la mano en lo referente a su ensamble.
- Detección de puntos débiles en el diseño.
- Rediseño de piezas y del ensamble para mejorar la eficiencia del proceso.
- Reporte de los cambios sugeridos.
- Síntesis del rediseño por medio de un modelador de sólidos.

Capítulo 2. Marco Teórico

EL DISEÑO PARA ENSAMBLE

El proceso que se lleva a cabo cuando se está desarrollando un producto es realmente complicado, ya que se deben tomar en cuenta muchos factores que se engloban dentro del diseño, manufactura, ensamble y distribución. Resulta de gran importancia evitar sobre pasar costos de producción ya que esto podría afectar seriamente las finanzas de la empresa, sin embargo, se debe tener mucho cuidado al tratar de reducir costos en ciertas áreas.

Ciertamente, el reducir estos costos debe tratarse con cuidado, ya que por ejemplo, el hacerlo en la parte de materiales puede dar como resultado un producto de baja calidad, es decir, puede llegar a fallar o a causarle diversos problemas al consumidor final, y no está por más decir que no resulta ético.

Sin embargo una de las áreas en la cual se puede aplicar la reducción de costos es en el área de ensamble, ya que, el cambio de varias piezas a una, nos da como resultado un producto más fácil de ensamblar para la máquina u operador ya que se reduce el tiempo para construir la pieza final y por lo tanto reducción de costos.

2.1 HISTORIA DEL DISEÑO PARA ENSAMBLE

En un principio, el ensamble de productos era llevado a cabo por trabajadores o artesanos, para poder realizar estos trabajos se debía contar con una gran habilidad en ensamble y manufactura, ya que debían enfrentarse a la resolución de problemas que surgieran en el armado de la pieza, esto significaba un costo elevado ya que debían ser capacitados por trabajadores con experiencia, lo que llevaba un tiempo.

Hacia el año 1798, ya que la guerra entre Estados Unidos y Francia era inminente, se solicitó la manufactura y ensamble de cerca de 10,000 mosquetes, siendo esta cifra demasiado grande, el único que aceptó fabricarlas en cerca de 28 meses fue el inventor y fabricante Eli Whitney (Boothroyd, 2005).

La contribución más grande que Whitney aportó a la industria de los Estados Unidos fue la implementación del sistema de fabricación y la línea de montaje, y fue esta la que implementó para la fabricación de los casi 10,000 mosquetes. Mientras que, en segundo plano, en Francia el inventor francés Honoré Le Blanc también desarrolló este sistema para la fabricación de mosquetes para el ejército francés (Boothroyd, 2005).

Gracias a la contribución de Whitney se empezó a desarrollar el concepto de diseño para ensamble y manufactura, esto trajo consigo tres desarrollos principales los cuales eran, primero, las piezas que son manufacturadas por máquinas resultan de mayor calidad que las que pueden ser hechas a mano, pues éstas suelen ser más precisas, es decir, el margen de error es bastante pequeño; segundo, la precisión del producto final puede mantenerse en un estándar alto; y tercero, la tasa de producción puede ser incrementada significativamente (Boothroyd, 2011).

Ya inventada la línea de montaje, se necesitó un sistema el cual transportara un elemento de un lugar a otro, sin necesidad de que un trabajador realizara esta operación, es decir, por medio de una máquina, fue Oliver Evans, inventor Estadounidense, quien inventó el sistema que ahora conocemos como banda transportadora, la cual agilizó significativamente las líneas de producción (Boothroyd, 2005).

En 1849, Elihu Root retomó el trabajo hecho por Whitney y desarrolló lo que se conocía como la división del trabajo, esta surgió cuando Root fue contratado en la compañía Colt, en donde ayudó a producir la llamada Colt Six-Shooter, él dividió el trabajo de ensamble en un gran número de pasos que resultaban más fáciles de llevar a cabo, también dio como resultado una producción más rápida, con menor margen de errores y reducción de costos, pues el trabajador no necesitaba tener una capacitación mayor para el trabajo que desarrollaba (Boothroyd, 2005).

Frederick Winslow Taylor, ingeniero mecánico y economista, en el año de 1878 mejoró la eficiencia de los trabajadores mediante la reducción de movimientos innecesarios, esto dio inicio al método de estudio de tiempo y movimientos en la tecnología de la manufactura. Frederick estudió los movimientos de los trabajadores y determinó cual era la correcta velocidad y movimientos que se requerían para el ensamble y manufactura de la pieza final (Boothroyd, 2005).

Todos los sistemas antes mencionados fueron después retomados por Henry Ford quien es hasta ahora reconocido como el inventor de la línea de ensamble, él describió los principios de ensamble con las siguientes palabras (Ford, 1904):

...”Place the tools and then the men in the sequence of the operations so that each part shall travel the least distance while in the process of finishing.
Use work slides or some other form of carrier so that when a workman completes his operation he drops the part always in the same place which must always be the most convenient place to his hand — and if possible, have gravity carry the part to the next workman.
Use sliding assembly lines by which parts to be assembled are delivered at convenient intervals, spaced to make it easier to work on them.”...

Traducido al español:

...”Coloque las herramientas y luego el hombre en secuencia para las operaciones, de modo que cada parte deberá viajar la menor distancia en el proceso de acabado.
Utilice transportadores u otra forma de llevar, para que cuando un trabajador complete su operación él pueda colocar las piezas siempre en el mismo lugar, que debe ser el lugar más conveniente para su mano — y si es posible, utilizar la gravedad para llevar la parte al siguiente trabajador.
Use líneas de ensamble por el cual las partes que serán ensambladas sean entregadas en un intervalo conveniente para hacerles el trabajo más sencillo de realizar.”...

Estos principios fueron aplicados al automóvil “T” de Ford, lanzado al mercado el 1 octubre de 1908, era fabricado uno a la vez por un grupo de trabajadores, la línea de producción fue primero

utilizada en el ensamble del magneto del volante, el tiempo de ensamble de éste tomaba originalmente 20 minutos y al aplicar este sistema se redujo a 13 minutos con 10 segundos y estaba dividido en 29 estaciones de trabajo, incluso observaron que si la línea de producción era aumentada 8 pulgadas el proceso podía llegar a los 5 minutos (Boothroyd,2005).

La mayoría de estos trabajos de ensamble eran hechos a mano por trabajadores, es decir, eran ensambles manuales; en las líneas de producción los operadores iban jalando la banda transportadora con la pieza a armar y así sucesivamente hasta lograr el producto final.

Sin embargo, poco tiempo después se fueron introduciendo los ensambles automáticos, estos son realizados por robots o máquinas, las cuales ensamblaban, por lo regular, piezas que son vendidas en gran escala como los relojes; la introducción de este sistema fue por dos causas, la primera que el tiempo era reducido considerablemente y segundo una mayor necesidad de precisión, poco a poco los trabajadores fueron desplazados de algunas áreas de trabajo, hoy en día aún muchos de los productos son ensamblados a mano.

Con esto se hizo presente la automatización, éste es un sistema en donde se utilizan elementos computarizados o mecanismos para controlar maquinaria o llevar a cabo procesos industriales.

El diseño para ensamble y manufactura es la combinación de ambos diseños, uno es aquel que describe la forma en que un pieza va a ser manufacturada mientras que el otro los hace enfocado a cómo es que esas piezas manufacturadas irán ensambladas unas con las otras para formar el producto final.

En los años 1960's, ya con la aparición de los primeros robots industriales, se comenzó a desarrollar el manejo de partes automáticamente, Geoffrey Boothroyd, ingeniero mecánico es considerado el padre del diseño para ensamble y manufactura pues creó un manual que resolvía ciertos problemas al interactuar con piezas de tamaño pequeño tanto para ensamblarlas como para diseñarlas.

No fue hasta 1970 que el diseño para ensamble comenzó a dar frutos, los tiempos para el armado de piezas pequeñas era considerablemente reducido, estos resultados surgieron de una investigación apoyada por el "National Science Foundation" y gracias a esto se publicó el artículo llamado "Assembly Engineering" en el cual Sidney Liebson, director del área de manufactura de Xerox, afirmaba que: "EL DFA le ahorrará a su compañía cientos de millones de dólares cada año".

En el mismo año, ya que estaban los microcontroladores en apogeo, se comenzó a crear un software tomando en cuenta el manual de Boothroyd, el cual hiciera el trabajo del diseño para ensamble más sencillo, éste era calculado por la computadora a diferencia de que en otros países europeos era calculado a mano, la primera computadora que soportó este software fue la Apple II plus (Boothroyd, 2005).

Después en el año de 1988, la empresa de Henry Ford, empezó a fabricar un auto llamado Taurus utilizando el software de DFA creado para la Apple II plus de IBM, el resultado fue un ahorro de millones de dólares, pues fue comparado con el modelo Pontiac Grand Prix de General Motors (GM) y el resultado fue que el auto de Ford contaba con sólo diez piezas en la parrilla que ensamblaban fácilmente a diferencia de las cien de GM (Ford, 1994).

Boothroyd también mostró que utilizar el tiempo necesario al diseñar el producto se compensa en los ahorros que arroja el producto final, en Junio de 1989, en la compañía Ingersoll-Rand redujo el desarrollo de dos años a uno sólo, a esta conclusión se llegó cuando se redujeron las piezas de un compresor y un enfriador de aceite de 80 a 29, los sujetadores de 38 a 20, dejando un total de 40 operaciones de ensamble de las 159 que estaban originalmente, reduciendo de 18.5 a 6.5 minutos este proceso (Boothroyd, 2005).

Otra razón por la cual el diseño para ensamble y el diseño de manufactura son importantes es porque éste representa un 70% del costo final, el 30% restante corresponde a materiales, mano de obra y gastos generales.

La unión del diseño del producto y la manufactura resulta esencial ya que, generalmente, los diseñadores hablan poco o nada con los ingenieros de manufactura, lo que puede traer problemas durante el proceso de fabricación del producto, a esto se le conoce como “Enfoque sobre la pared” que da la idea de que cada parte trabaja de un lado de esta pared (Boothroyd, 2011)[[]].

Uno de esos problemas es que el proceso de manufactura resulte extremadamente complicado y costoso, es por eso que es necesario un equipo llamado “ingeniería simultánea” o “ingeniería concurrente” y de esta manera poder hacer una evaluación correcta desde la etapa del diseño.

El término de ingeniería concurrente comenzó a ser mencionado en 1986 en el reporte R-338 del Instituto de Análisis de Defensa, donde lo definen como: ...”Un esfuerzo sistemático para un diseño integrado, concurrente del producto y de su correspondiente proceso de fabricación y servicio. Pretende que los encargados del desarrollo desde un principio, tengan en cuenta todos los elementos del Ciclo de Vida del Producto (CVP), desde el diseño conceptual hasta su disponibilidad, incluyendo calidad, costo y necesidad de los usuarios”...

2.2 ESTADO ACTUAL DEL MÉTODO

Aunque el método de Boothroyd de diseño para ensamble proviene de la década de los 80's, hoy en día sigue siendo ampliamente usado para la evaluación de diseños. En (Stone, McAdams, y Kayyalethekkel, 2004) se pueden encontrar dos casos de estudio en los cuales se logra una reducción significativa de partes y se hace una comparación respecto al número mínimo teórico de éstas.

En (Prakash, Sridhar, y Annamalai, 2014) se logran integrar los conceptos de diseño para ensamble con una de las tecnologías emergentes más importantes en la actualidad, el *rapid prototyping*; para mostrar su aplicación se rediseña y fabrica una válvula para control de flujo. Otro ejemplo de aplicación se puede encontrar en (Favi y Germani, 2012), en este trabajo se estudian productos modulares y se aplica el método para analizar las interconexiones entre módulos; al usar el método logran reducir el número de piezas y de interconexiones.

La aplicación del método se extiende más allá del rediseño de productos. En éste sentido podemos encontrar en (Todić, Lukić, Milosević, Jovičić, y Vukman, 2012) el uso del método para evaluar la factibilidad de manufacturar distintas piezas. En (Wood, Wood, y Mattson, 2014) se estudia el cómo aplicar el método en países en desarrollo y el efecto que éste puede tener para volver a los productos accesibles para un público mayor.

Para facilitar la aplicación del método, se han realizado trabajos para integrarlo con tecnologías informáticas. Por ejemplo en (da Silva, Salgado, Mello, da Silva Oliveira, y Leal, 2014) se hace uso de simulación por computadora de los efectos del rediseño para ahorrar tiempo en las iteraciones del método. Otro caso es el trabajo (Jum'Azulhisham, S., A., y Rosdzimin, 2010), aquí se desarrolla un software que permita a sus usuarios aplicar el método de Boothroyd aun si no están familiarizados con éste.

Inicialmente una de las limitantes del método era que sólo podía ser usado para piezas "pequeñas" pero, actualmente en (García-Guerra y Dorador-González, 2013) se hace un análisis de los métodos que han tratado de resolver este problema como en (Sturgesi, 1991) en el cual se consideran piezas grandes y pesadas a las que se les son asignadas un índice para su evaluación, la misma autora García-Guerra actualmente se encuentra trabajando en una modificación del método Boothroyd para su aplicación en la industria de este tipo de partes.

2.3 MANO CDMIT (Flores, 2007)

La mano CDMIT fue diseñada y fabricada en el año 2007 por dos estudiantes de la Facultad de Ingeniería para la obtención del grado de Ingenieras Mecánicas, estas dos estudiantes, Itzel Flores y Ana Juárez fueron supervisadas y dirigidas por los ingenieros Jesús Manuel Dorador y Mariano García y recibieron asesoría de diversas personas del Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, CDMIT en donde se desarrolló este proyecto.

Para la generación de esta mano protésica se realizó una extensa investigación acerca de los antecedentes de diferentes prótesis en la historia así como el estado del arte de las mismas, con ayuda de estas investigaciones se optó por utilizar el mecanismo desarrollado por la Universidad de Toronto para una movilidad más natural de los dedos.

La mano de la Universidad de Toronto cuenta con cinco dedos los cuales tienen tres falanges cada uno, al igual que la mano humana, esto hace que los movimientos generados sean más naturales, también elimina el tener un motor en cada articulación, este mecanismo se muestra a continuación:

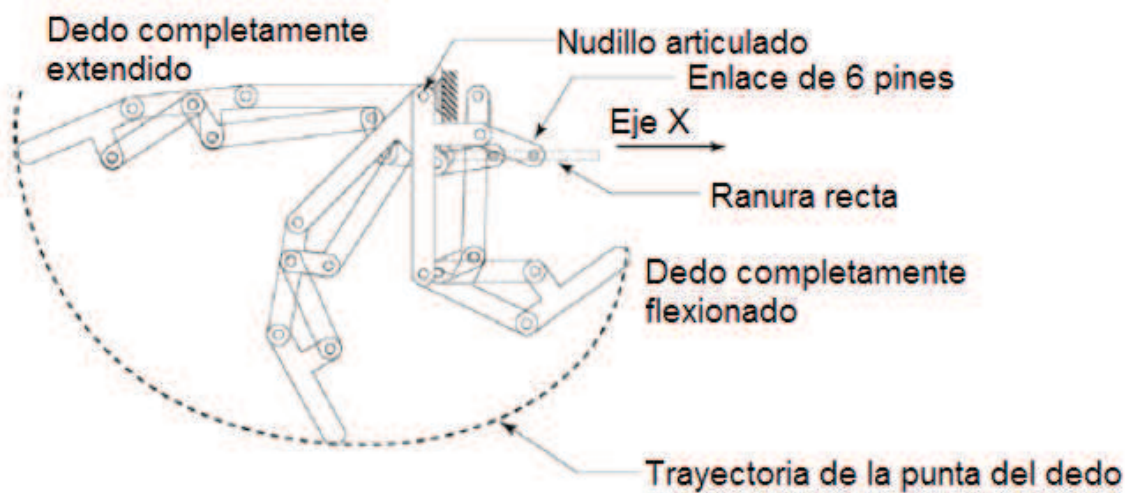


Fig. 1 Mecanismo Universidad de Toronto (Flores, 2007)

Para el movimiento de los dedos se realizaron los cálculos necesarios de la cinemática del mecanismo por medio de triángulos, esto para adaptar el mecanismo de Toronto a la prótesis que se estaba desarrollando, para realizar estos cálculos se hizo uso de los ángulos naturales de la mano, con ecuaciones que rigen al mecanismo manivela-corredera de 4 barras, esto fue programado en lenguaje C, esto fue calculado para los cinco dedos, a continuación se muestra el mecanismo del dedo índice.

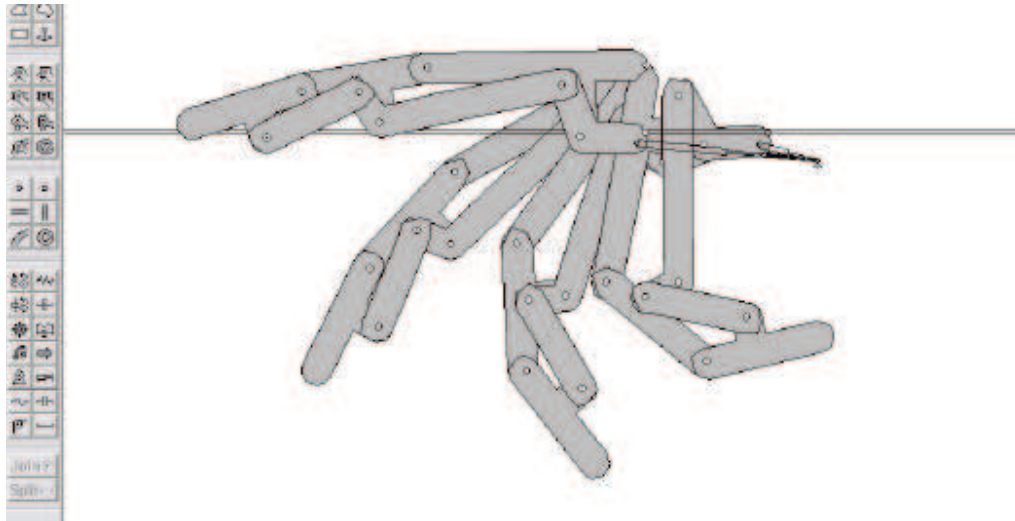


Fig. 2 Simulación del Dedo índice en 2D con ayuda de Working Model (Flores, 2007)

Una vez obtenidos los cálculos para el movimiento que describiría cada dedo, se prosiguió a realizar el diseño de la carcasa, para ellos de nuevo se consideró la morfología de una mano humana, para generarla se crearon diversos diseños de los cuales finalmente uno cumplió con las expectativas correctamente.

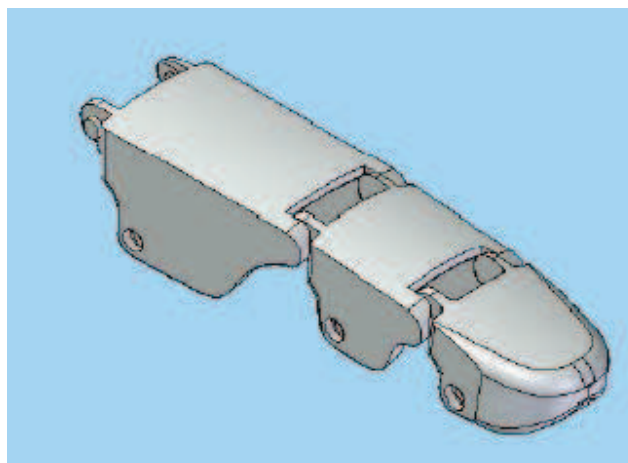


Fig. 3 Diseño final de dedo índice modelado en CAD (Flores, 2007)

Ya seleccionadas las carcasas de cada dedo se realizó el modelado de éstas por medio del software CAD, en la siguiente figura se observan todos los dedos con su mecanismo y su carcasa.

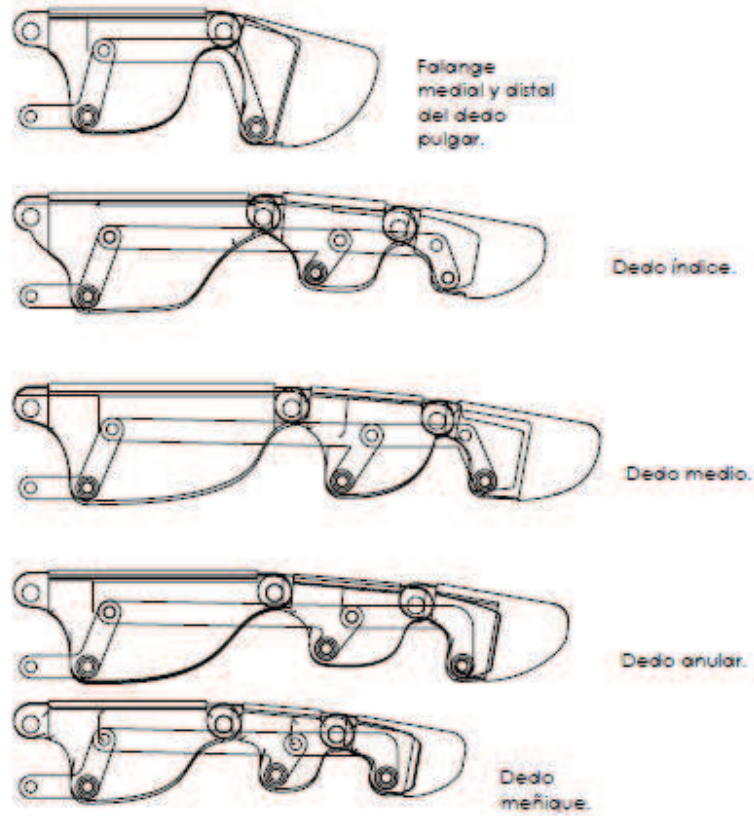


Fig. 4 Cinco dedos con mecanismos y carcasas finales (Flores, 2007)

Para generar las uniones entre los mecanismos se diseñaron tres tipos de pernos; el perno para unir el mecanismo, el perno para unir el mecanismo con la carcasa y el perno para unir las correderas a las cremalleras. En total se diseñaron y fabricaron 15 pernos de aluminio para evitar fricciones entre el mecanismo y la carcasa y con un seguro truack para evitar deslizamientos.

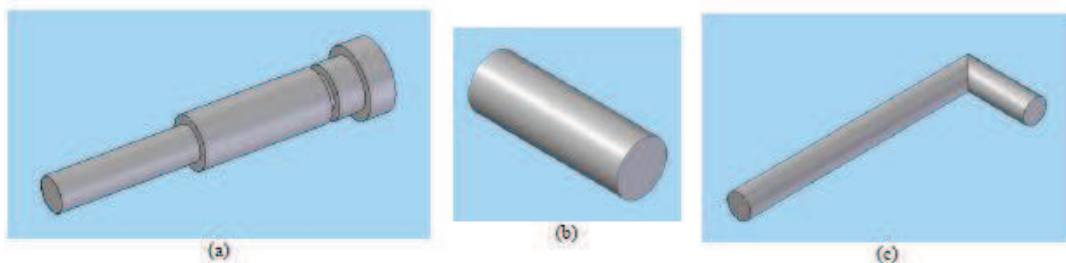


Fig. 5 Pernos a) Perno mecanismo-carcasa, b) perno intermecanismo, c) perno corredera-cremallera. (Flores, 2007)

La palma y el dorso se diseñaron posteriormente, en la palma se decidió que iría la transmisión, es decir, la unión de los motores al mecanismo que harían que se moviera cada dedo, para colocar los servomotores se diseñaron espacios especiales al tamaño del motor para que éste prácticamente sólo se asentara sin necesidad de ser fijado con piezas adicionales.

Para la transmisión se usaron engranes cremallera-piñón, los cuales fueron unidos al mecanismo por medio de los pernos que se mostraron en la Fig., el piñón fue acoplado al eje del servomotor; en total se utilizaron 4 servomotores, ya que el dedo meñique y el dedo anular se moverían con un mismo motor, y uno para cada dedo restante.

Tanto el dorso como la palma cuentan con una serie de canales y espacios especiales para actuadores, medios de transmisión y cableado, el diseño final de la palma y dorso se muestran en la siguiente figura, éstos fueron modelados en CAD.

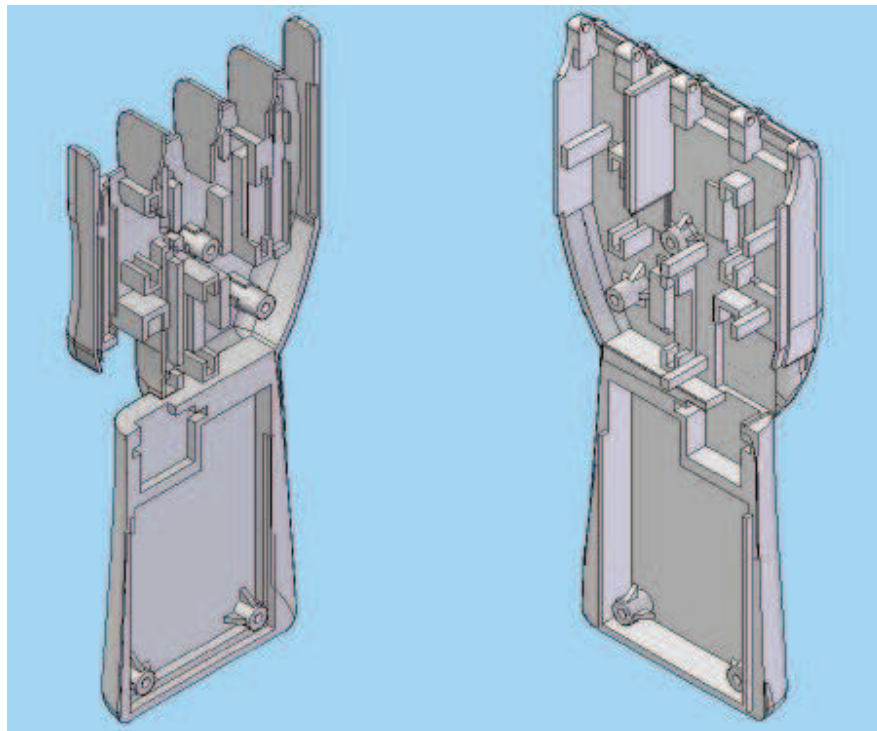


Fig. 6 Palma y dorso modelados en CAD (Flores, 2007)

2.4 MÉTODO BOOTHROYD (Boothroyd, 2005) (Boothroyd, Dewhurst y Knight 2010) (Boothroyd 1982)

El método que utilizaremos en este proyecto es conocido como el método de Boothroyd, llamado así gracias a su creador Geoffrey Boothroyd en 1960. Este método, a diferencia de otros, da como resultado tiempos de sub-ensambles y por último un porcentaje que califica la eficiencia del ensamble.

Este método se basa principalmente en reducción de tiempos de operación y fácil ejecución, logrando lo anterior por medio de la reducción del número de piezas, ya que muchas de ellas pueden simplificarse a sólo una para así evitar tener sub-ensambles o piezas innecesarias.

Para esto, el método considera tres criterios los cuales son:

1.- Durante la operación la pieza se mueve en relación a las piezas ya ensambladas. Sólo movimientos bruscos deben ser considerados ya que movimientos delicados pueden deberse a elementos elásticos.

2.- ¿Debe la pieza ser de un material diferente o aislada de las otras piezas ya ensambladas? Depende de las propiedades del material.

3.- La pieza debe estar separada de todas las demás piezas ensambladas; de lo contrario, el montaje de piezas de cumplir uno de los criterios anteriores sería impedido.

Estos tres criterios resultan fundamentales puesto que son la base para realizar un buen diseño o rediseño que disminuya tiempos de operación, son aplicados al momento de realizar el análisis del producto, el cual, se lleva a cabo por medio de una serie de tablas y fórmulas ya definidas por el autor.

2.5 DISEÑO PARA ENSAMBLE MANUAL (Boothroyd, 2005) (Boothroyd, Dewhurst y Knight 2010) (Boothroyd 1982)

Dentro del método de Boothroyd, existen dos áreas de aplicación, el ensamble manual (llevado a cabo por un operador) y el ensamble automático (ensambles realizador por medio de máquinas previamente programadas).

En este caso de estudio se hará uso del método del ensamble manual, ya que, el ensamble de este producto aún necesita de la conciencia humana para ser llevado a cabo; generalmente en la industria, el uso de maquinaria programada está enfocada más hacia tareas como las de pintura, soldadura, llenado de envases, etc.

El análisis de ensamble manual cuenta con tres tablas, en una de ellas se introducen los datos que se obtienen de las otras dos, en esta primera tabla es necesario colocar número de pieza, nombre de la pieza, códigos de dos dígitos de manejo y de inserción que a su vez nos entregan sus respectivos tiempos, piezas mínimas teóricas, número de veces que se lleva a cabo la operación y nombre del ensamble.

La segunda tabla definida por el autor, permite obtener el código de dos dígitos de manejo manual, para seleccionar este código es necesario saber varios aspectos sobre la pieza a ensamblar estos son, primero si la pieza puede ser manejada con una mano, con una mano y ayuda de sujetadores o con dos manos.

Una vez detectado lo anterior ya podemos obtener el primer número de este código, para ello se hará uso de los ángulos de orientación, uno de ellos es α o Alfa simetría, este depende del ángulo a través del cual una parte se debe girar alrededor de un eje perpendicular al eje de inserción y el segundo, β o Beta simetría, que depende del ángulo a través del cual una parte se debe girar alrededor del inserción.

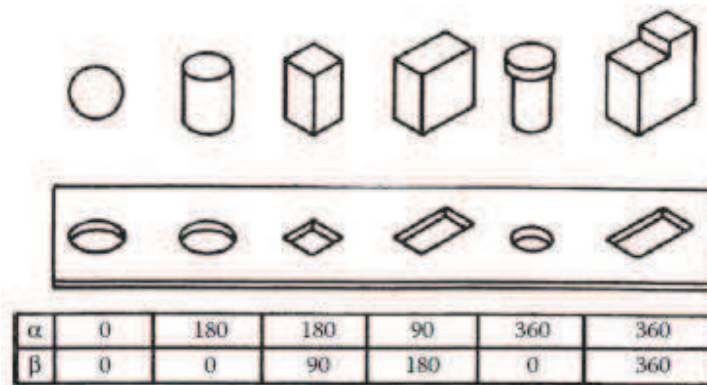


Fig. 7 Alfa y Beta rotacional para varias partes (Boothroyd, 2011)

La suma de estos dos ángulos nos dará el primer número del código de manipulación manual, como se observa en la figura, estos ángulos son 0, 90, 180 o 360, entre mayor es este número, mayor será el tiempo empleado para realizar su ensamble, ya que sólo existirán ciertas maneras correctas de insertarlo a diferencia, por ejemplo, de la esfera que puede entrar en cualquier posición en la que se encuentre en el agujero circular.

Una vez obtenida esta suma se hace la consulta de las tablas de manipulación manual, si este proceso puede hacerse con una mano, entonces, si la suma es menos a 360 el número a introducir primero será el 0, si la suma es mayor igual a 360 pero menor a 540 entonces el número será 1, si la suma es mayor igual a 540 pero menor que 720 el número será 2, por último si esta suma resulta igual a 720 entonces este primer dígito será igual a 3,

Existen también otras posibilidades en las cuales se hace uso de ayuda de herramientas de sujeción, esto podemos verlo en la siguiente imagen, en donde se muestra las tablas para ensamble con una mano y con una mano y ayuda de herramental de sujeción.

Las partes pueden ser sujetadas y manipuladas con una mano sin necesidad de ayuda de herramientas de sujeción	$(\alpha + \beta) < 360^\circ$	0	
	$360^\circ \leq (\alpha + \beta) < 540^\circ$	1	
	$540^\circ \leq (\alpha + \beta) < 720^\circ$	2	
	$(\alpha + \beta) = 720^\circ$	3	
Una mano			
Las partes pueden ser sujetadas y manipuladas con una mano pero sólo con el uso de herramientas de sujeción.	$\alpha \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	4
		$\beta = 360^\circ$	5
	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq \beta \leq 180^\circ$	6
		$\beta = 360^\circ$	7
Una mano con herramienta de sujeción			

Fig. 8 Tabla para obtención de primer dígito de manipulación manual (Boothroyd, 2011)

Para el segundo número del código de manipulación manual, debemos saber si las piezas son fáciles de sujetar y manipular, si son tan pequeñas que necesiten un lente para mejorar su visualización, es necesario conocer el espesor y tamaño mínimo, si estas son delicadas, resbaladizas o pegajosas, seleccionado la opción correcta obtendremos este segundo número, que será introducido en la tabla de datos en la tercer columna “Código de dos dígitos de manipulación manual”.

Al intersectar ambos números obtenidos, en la tabla de manipulación manual, primero fila y después columna, podremos conocer el tiempo estimado en segundos en que la pieza será ensamblada, éste dato es introducido en la tabla de recolección de datos en la columna número 4 que corresponde al “Tiempo de manipulación manual”.

El siguiente dato importante a conocer es el Tiempo de Inserción Manual, éste también es obtenido mediante dos números los cuales se obtienen por medio del análisis de la pieza a insertar.

Para obtener el primer dígito de este segundo código es necesario saber si la pieza, al ser ensamblada, se ensambla pero no está asegurada, es decir, necesita de otra pieza para su sujeción como tornillos, pernos, remaches, etc., por otro lado, al ser ensamblada ésta se encuentra asegurada inmediatamente como sucede, por ejemplo, con los snap-fits, otra opción es que al ser ensamblada necesite otra operación como por ejemplo que ésta sea soldada.

Al localizar la opción correspondiente a nuestro ensamble tendremos que seleccionar otras características como son si la pieza puede alcanzar la locación deseada fácilmente, si el ensamble esta obstruido física y/o visualmente por otra pieza o si el ensamble no puede realizarse fácilmente por otros motivos; con lo anterior ya podremos obtener el primer dígito del segundo código.

El segundo dígito se obtiene analizando si para el ensamble, es necesario presionar para mantener la orientación y localización o no, si es fácil de alinear y posicionar o no y si el ensamble se resiste a la inserción o no.

Con estos dos números ya podemos conocer el tiempo estimado en segundos de la Inserción Manual, este tiempo se obtiene intersectando ambos números en la tabla correspondiente a este proceso.

Una vez obtenidos el tiempo de manipulación e inserción manual, ya es posible conocer el tiempo final que se llevará el hacer esta operación para ello se hace uso de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} & \textit{Tiempo de operación} \\ & = \textit{Número de veces que es llevada a cabo la operación} \\ & * (\textit{Tiempo de manipulación manual} + \textit{Tiempo de inserción}) \end{aligned}$$

El siguiente paso es uno de los más importantes y en lo que se basa este método, ya que de éste depende la eficiencia total de ensamble, para obtener el siguiente dato es necesario responder las tres preguntas planteadas con anterioridad en el apartado 2.1, si al menos una de ella es afirmativa, entonces, la columna número nueve de la tabla en dónde se depositan los datos será uno, en caso de que todas sean negativas se colocará un cero.

Con ése último dato ya es posible obtener la información que interesa. Para conocer el tiempo total que llevará el ensamble del producto final simplemente se deben sumar los tiempos de operación obtenidos con la fórmula anterior de cada una de las operaciones realizadas, es decir, la suma del tiempo de operación de cada subensamble, este dato será llamado TM.

Para obtener la eficiencia total de diseño, primero se realiza la suma de los “unos” obtenidos en la columna nueve, en la cual se respondieron las tres preguntas que formula el método, este dato es llamado Mínima Cantidad de Piezas o NM, es entonces que se aplica la siguiente fórmula:

$$E_{ma} = \frac{t_a * N_{min}}{T_{ma}}$$

En dónde t_a es el tiempo de ensamble básico (de manipulación y de inserción) de una sola pieza y puede ser tomado como 3 segundos en promedio.

2.6 CRITERIOS DE DISEÑO

Para que el diseño para ensamble resulte práctico y eficiente es necesario que el tiempo para el completo ensamble de un producto sea el mínimo posible, para lograr este objetivo generalmente se hace uso de ciertos criterios de diseño, estos criterios son usados por diseñadores y el mismo Boothroyd enfatiza en ellos para aumentar la eficiencia de ensamble en su método.

Existen diferentes tipos de criterios, están los que facilitan el ensamble de la pieza, ajustándola para que tenga varios ejes de ensamble posibles, por ejemplo, están también por otro lado los que facilitan el separar cada pieza del granel sin que ésta se atore con otras, a continuación se explicarán estos criterios a detalle.

- **Pieza simétrica:** El diseñar una pieza completamente simétrica nos permite generar al menos dos ejes de inserción, lo que facilita al trabajador su ensamble.



Fig. 9 Pieza simétrica y no simétrica (Boothroyd, 2011)

- **Pieza asimétrica:** Si la pieza no puede ser diseñada de forma simétrica por la razón que sea, entonces, ésta deberá ser lo suficientemente asimétrica para que visualmente sea fácil detectar su orientación.

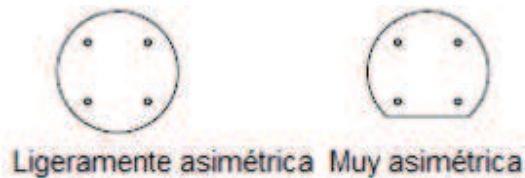


Fig. 10 Pieza ligeramente y muy asimétrica (Boothroyd, 2011)

- **Atasco:** Para evitar que una pieza se atasque con otra durante el ensamble o cuando ésta es tomada del montón de granel, es necesario agregar al diseño ciertas modificaciones que lo impidan como se muestra en la figura.

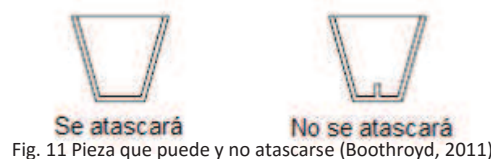


Fig. 11 Pieza que puede y no atascarse (Boothroyd, 2011)

- Enredo: Al igual que para evitar el atasco de piezas cóncavas, el evitar el enredo de piezas a la hora de ensamblar o de retirar del montón de granel, es necesario diseñarles una geometría que lo impida, esto se logra minimizando aberturas o que éstas no sean rectas.



Fig. 12 Pieza que puede y no enredarse (Boothroyd, 2011)

- Traslape: Cuando se toma una pieza de un montón, ésta puede traslaparse con otra, es por eso que es necesario crear ángulos grandes o filos más gruesos para evitar que esto suceda.



Fig. 13 Piezas traslapadas y no traslapadas (Boothroyd, 2011)

- Estabilidad: Unos de los problemas con piezas que no se aseguran inmediatamente después de ser insertadas es que éstas pueden llegar a moverse y salir de su lugar antes de que se coloque el elemento de unión, es por eso que es necesario añadirles estabilidad, esto se logra creando formas adecuadas para que éstas asienten adecuadamente y no se muevan, un ejemplo se muestra en la siguiente imagen.



Fig. 14 Piezas que salen fácilmente de su lugar y piezas que se asientan sin problema (Boothroyd, 2011)

- Conectores: El tener una serie de conectores como tubos, cables, líneas etc. Dificultan el ensamble de las piezas, es recomendable reducir éstos al máximo o eliminarlos si es posible mediante un reposicionamiento de las piezas.

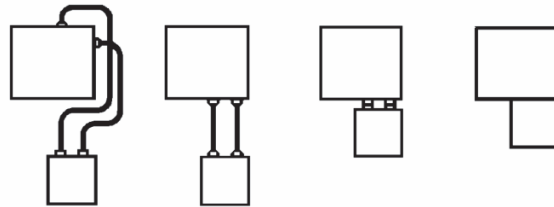


Fig. 15 Eliminación de conectores con reposicionamiento (Boothroyd, 2011)

- Posicionamiento: Al insertar una pieza, una dentro otra por ejemplo, a veces es difícil lograr que ésta se posicione correctamente en su lugar debido a obstrucciones visuales o físicas, es por esto que el facilitar el posicionamiento de una pieza es necesario, crear rampas en la que ésta resbale es un ejemplo que se muestra en la siguiente figura.

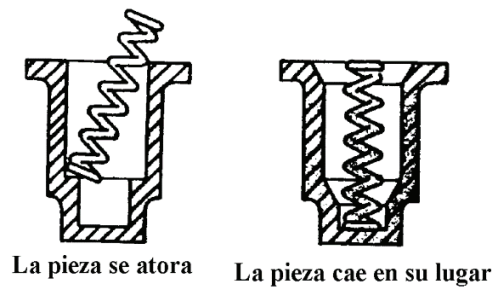


Fig. 16 Ejemplos de posicionamiento inmediato (Boothroyd, 2011)

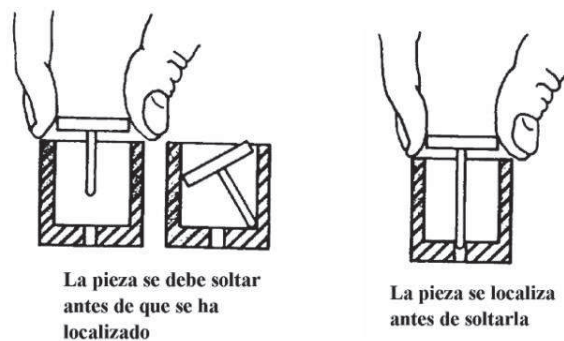


Fig. 17 Ejemplos de posicionamiento inmediato (Boothroyd, 2011)

- Manejo: Existen ciertas formas y geometrías las cuales dificultan al trabajador realizar su ensamble de manera eficiente, éstas son piezas flexibles, por su naturaleza puede resultar difícil de manejar pues no cuentan con una estabilidad para mantener su forma o quedarse en su sitio, también están las piezas filosas, éstas pueden ocasionar una lesión al trabajador durante su manejo, y por último piezas muy pequeñas que difícilmente pueden ser tomadas por la mano del trabajador lo que implica el uso de herramientas como pinzas para su manejo, en el diseño se trata de evitar este tipo de formas.

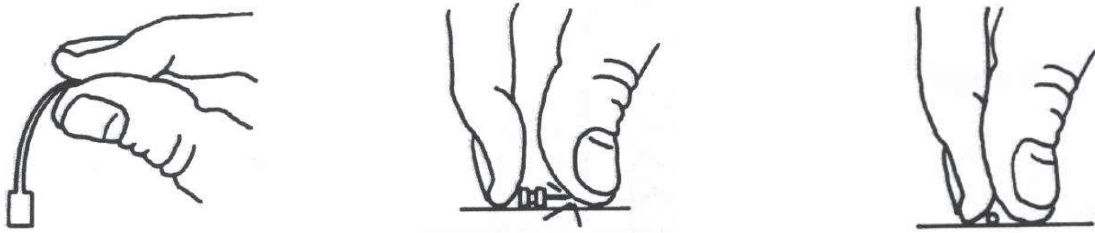


Fig. 18 Piezas flexibles, filosas o muy pequeñas son difíciles de manejar (Boothroyd, 2011)

- Disminución de piezas: A veces es posible hacer una reducción de piezas del producto, el quitar piezas no es eliminarlas por completo, si no, generar una sola pieza que contenga a éstas, con esto podemos disminuir considerablemente el tiempo de ensamble, un ejemplo de esto se muestra en la siguiente figura.

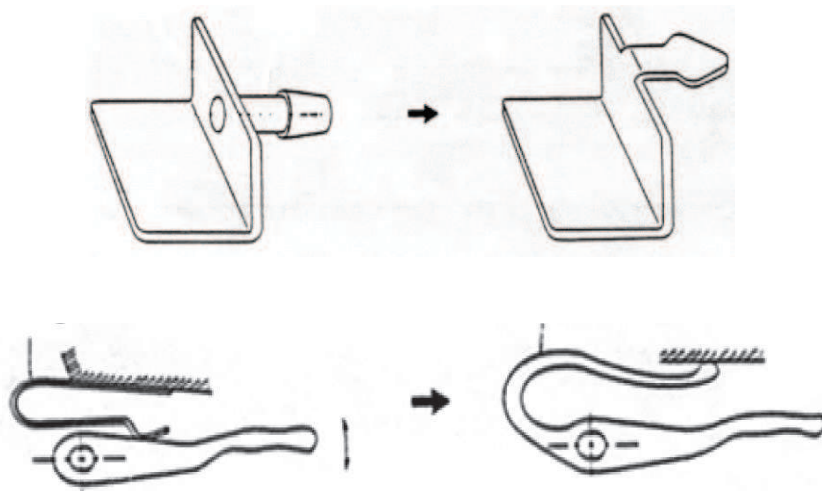


Fig. 19 Ejemplos de reducción de piezas para un diseño mejorado (Boothroyd, 2011)

- Pernos y tornillos: Unos de los elementos que causan mayor conflicto a la hora de realizar un ensamble son los pernos y tornillos, esto se debe a varias razones como pueden ser que, al ser tan pequeños, son difíciles de manejar, también en el caso de los tornillos, se necesita una operación extra para fijarlos, es recomendable realizar piezas que sean aseguradas inmediatamente por medio de los llamados “snap fit”.

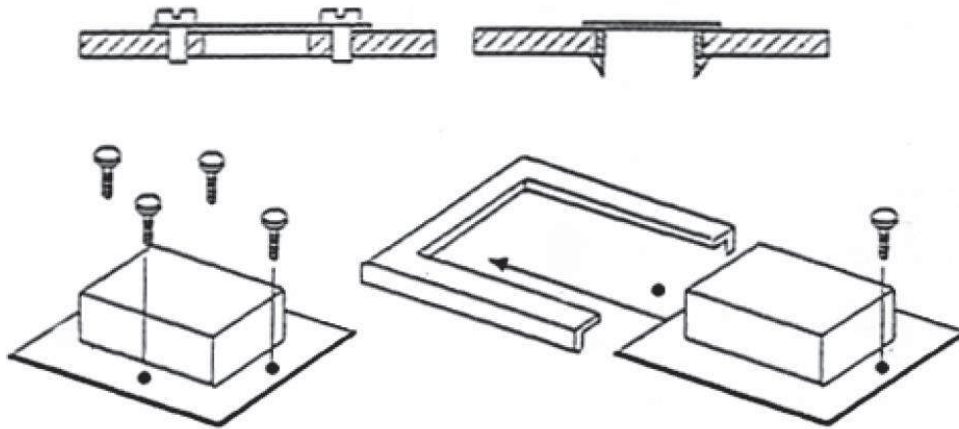


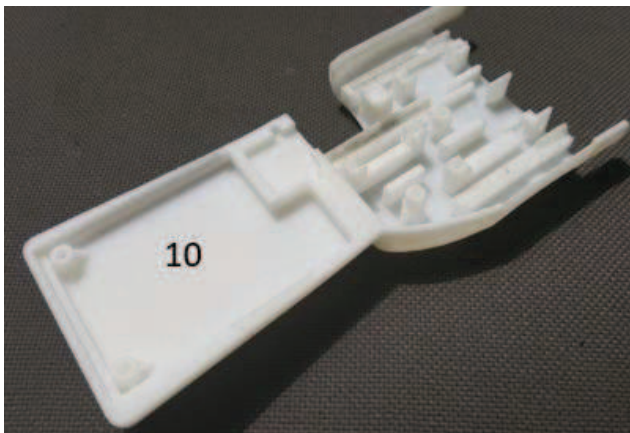
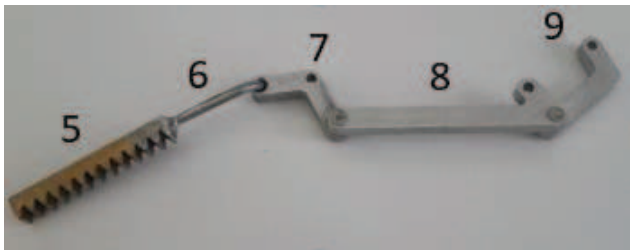
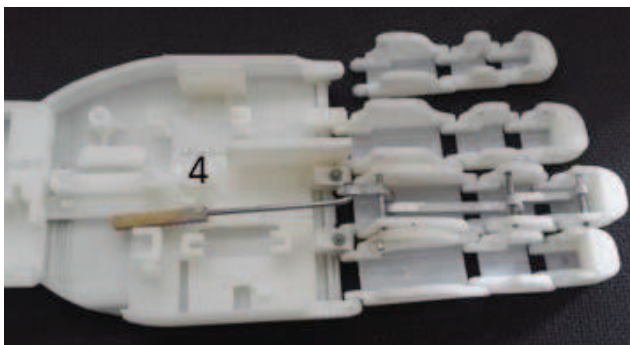
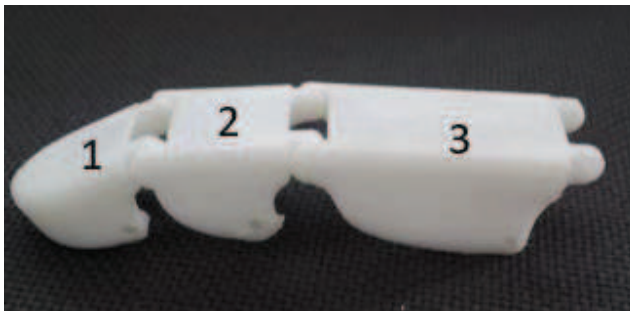
Fig. 20 a) Ejemplo de reemplazo de tornillos por “snap fit” b) Reducción de 4 tornillos a 1 (Boothroyd, 2011)

Capítulo 3. Pasos para ensamble (CDMIT), Aplicación y Análisis de resultados

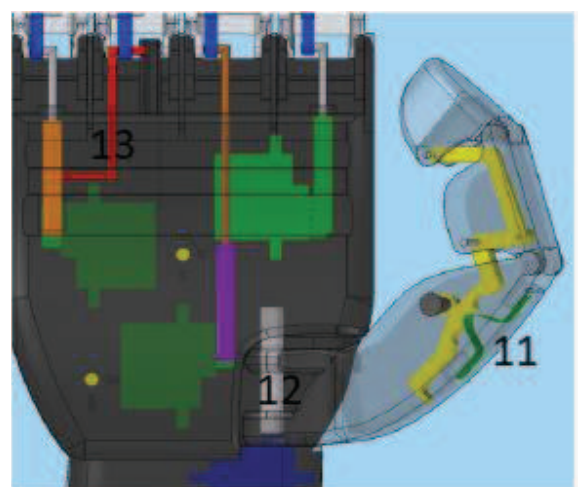
APLICACIÓN DEL MÉTODO

3.1 PIEZAS Y SUB ENSAMBLES

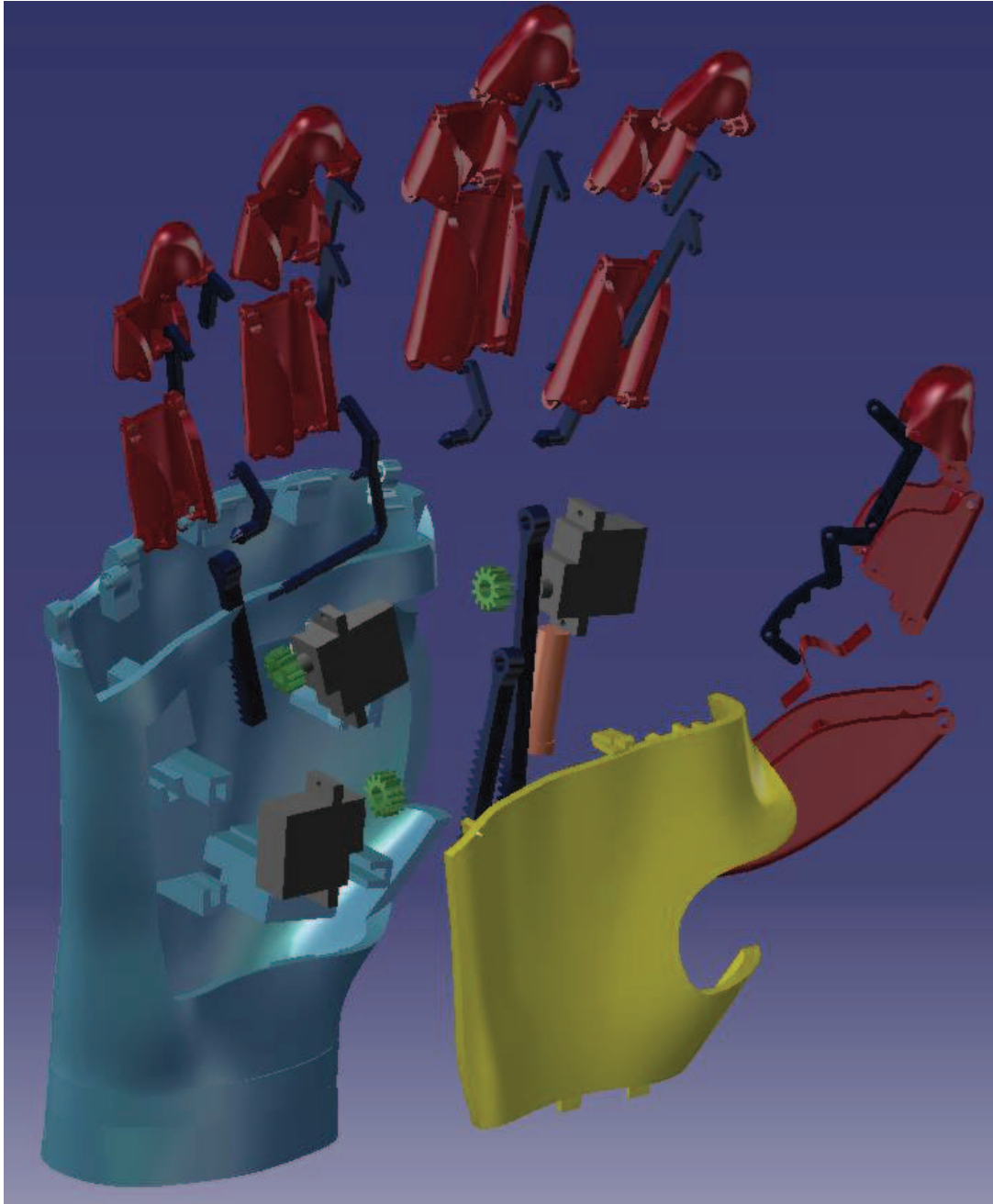
En esta sección se aplicará el método descrito a la mano CDMIT, éste se le realizará a todas las partes que la componen, para que éste análisis sea completamente entendible, a continuación se presentarán las piezas que la conforman y algunos sub ensambles, así como los nombres con los que serán identificadas en la tabla de resultados.



- 1 Falange distal
- 2 Falange media
- 3 Falange proximal
- 4 Dorso
- 5 Cremallera
- 6 Gancho
- 7 Eslabón 1
- 8 Eslabón 2
- 9 Eslabón 3
- 10 Palma (Tapa)
- 11 Resorte
- 12 Eje pulgar
- 13 Gancho Anular



SUB-ENSAMBLES



- Sub-ensamble Falanges
- ■ Dorso - Sub-ensamble Falanges
- ■ Eje pulgar – Sub-ensamble Falanges
- ■ Sub-ensamble Motor – Piñón

- ■ Sub-ensamble Dorso – Motores
- Sub-ensamble Barras
- ■ Sub ensamble Dorso – Palma (Tapa)
- ■ Sub-ensamble Dorso – Barras

3.2 PASOS PARA ENSAMBLE (CDMIT)

Para hacer un uso correcto del diseño para ensamble manual, es necesario establecer la serie de pasos que se realizarán para ensamblar cada una de las piezas, es decir, qué sub-ensambles se generarán primero y cuales después para poder finalmente ensamblarlos en una pieza única final.

Debido a que no se contaba con todas las 74 piezas a analizar para poder realizar un ensamble de las mismas, los pasos que se muestran a continuación son propuestos con ayuda de sus diseñadores.

El procedimiento propuesto que se siguió para el análisis de ensamble de la mano CDMIT fue el siguiente:

1. Inserción de falange proximal con falange medial, este proceso se lleva a cabo cuatro veces para los cuatro dedos: índice, medio, anular y meñique.
2. A los sub-ensambles del paso 1, insertar las falanges distales, este proceso se lleva a cabo cinco veces para los cinco dedos: índice, medio, anular, meñique y pulgar. Con este paso se tiene completo el *Sub-ensamble Falanges*.
3. Insertar el resorte del pulgar en la pieza que corresponde al metacarpiano de ésta, este paso se llevará a cabo una vez.
4. Insertar *Sub-ensamble Falanges* en el dorso, este proceso se lleva a cabo cinco veces para los cinco dedos de la mano. Con este paso se tiene completo el sub-ensamble *Dorso – Sub-ensamble Falanges*.
5. Insertar el eje de rotación del dedo pulgar para asegurar la inserción del dedo con el dorso y que éste pueda actuar como bisagra.
6. Alinear el eje de cada uno de los tres piñones con el eje de tres de los cuatro motores (uno quedará libre ya que pertenece al dedo pulgar) e insertar ambas partes para generar el *Sub-ensamble Motor-Piñón*.
7. Insertar los tres *Sub-ensamble Motor-Piñón* en el dorso y el motor del dedo pulgar, el motor del dedo pulgar debe ser insertado en el dorso y se debe alinear y posteriormente insertar el eje del motor con el eje del pulgar. Con este paso tendremos el *Sub-ensamble Dorso - Motores*.
8. En estos cuatro pasos siguientes se realizará la unión de barras del mecanismo de los dedos, en primer lugar se alinearán la barra 3 con la barra 2 haciendo coincidir ambos barrenos.
9. En seguida insertar el perno de unión para evitar que ambas piezas se separen, realizar este paso cinco veces para las barras 2 y 3 de los cinco dedos.
10. Al paso anterior agregar la barra 1, esto se logra alineando los barrenos de la barra 1 y la barra 2.
11. En seguida unir las barras 1 y 2 por medio de un perno, realizar este paso cinco veces para los cinco dedos.
12. Insertar el gancho en el extremo de la barra 1, realizar este paso cuatro veces para los cuatro dedos (índice, medio, anular y meñique).
13. Insertar la cremallera en el extremo del gancho, para asegurar esta unión es necesario realizar un proceso de soldadura, este paso se llevará a cabo 4 veces para los cuatro dedos

(índice, medio, anular y meñique). Para el caso de la cremallera de los dedos anular y meñique insertar ambos ganchos en la cremallera que ambos tienen en común. Con estos pasos se generará el *Sub-ensamble Barras*.

14. En este paso se realizará la unión del *Sub-ensamble Falanges* con el *Sub-ensamble Barras*, para cada sub-ensamble falange alinear su respectivo *Sub-ensamble Barras*, realizar esta operación cinco veces para los cinco dedos.
15. Para asegurar la unión del paso anterior colocar los tres pernos correspondientes a cada dedo, esta operación se llevará a cabo cinco veces para los cinco dedos. Con este paso se generará el *Sub-ensamble Dorso - Barras*.
16. Para la unión final del *Sub-ensamble Dorso Barras* es necesario engranar la cremallera con su respectivo piñón, este paso se llevará a cabo tres veces.
17. Alinear el *Sub-ensamble Dorso - Barras* con la palma e insertar hasta que esta quede "fija".
18. Para asegurar que el *Sub-ensamble Dorso - Barras* y la palma queden unidos atornillar los tornillos.

Con este último paso se tiene la mano CDMIT completamente ensamblada.

3.3 TABLA DE ANÁLISIS DE ENSAMBLE MANUAL

Número de pieza	Número de veces que la operación se lleva a cabo	Código de dos dígitos de manipulación manual	Tiempo de manipulación manual	Código de dos dígitos de inserción manual	Tiempo de inserción por parte	Tiempo de operación (s)	Estimación teórica de la mínima cantidad de piezas	Nombre de pieza	Nombre del ensamble	α	β	$\alpha+\beta$
1	5	30	1.95	00	1.5	17.25	1	Falange proximal		360	360	720
2	5	30	1.95	31	5	34.75	1	Falange medial	Falange Prox.- Falange Med.	360	360	720
3	5	30	1.95	31	5	34.75	1	Falange distal	Falange Med.- Falange Dist.	360	360	720
4	1	10	1.5	31	5	6.5	1	Resorte pulgar	Resorte - Sub Fal	180	180	360
									Sub Falanges			
5	1	30	1.95	00	1.5	3.45	1	Dorso	Dorso	360	360	720
6	1	30	1.95	31	5	6.95	1	Sub Falanges	Dorso-Sub Falanges	360	360	720
7	1	11	1.8	30	2	3.8	1	Eje pulgar	Eje p. -Sub Fal.	0	360	360
8	4	30	1.95	00	2	15.8	1	Motor	Motores	360	360	720
9	3	01	1.43	30	2	10.29	1	Piñón en manip y el ensamble en inserción	Piñón	180	0	180
									sub motor-piñón			
10	3	30	1.95	00	1.5	10.35	1	Sub motor-piñón	Dorso con motores	360	360	720
11	4	30	1.95	00	1.5	13.8	1	Barra 3	Barra2	360	360	720
12	4	30	1.95	00	1.5	13.8	1	Barra 2	Barra3	360	360	720
13	5	30	1.95	00	1.5	17.25	1	Barra 1	Barra1	360	360	720
14	4	13	2.06	95	8	40.24	0	Ganchos	Ganchos	0	360	360
15	3	20	1.8	30	2	11.4	1	Cremallera	Cremallera	360	180	540
16	25	11	1.8	30	2	95	0	Pernos	Pernos	180	0	180
									Sub Barras			
17	5	30	1.95	30	2	19.75	1		Dorso con barras	360	360	720
18	4	10	1.5	30	2	14	1		Engranar piñón con cremallera	180	180	360
19	1	30	1.95	00	1.5	3.45	1	Palma	Palma	360	360	720
20	4	11	1.8	38	6	31.2	0	Tornillos	Tornillos	360	0	360
								TM [s]	NM	Eficiencia	%	
	Piezas	74				403.8	17	0.126306404	12.63064045			

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez aplicado el método de diseño para ensamble manual de Boothroyd, es necesario realizar un análisis de los resultados obtenidos. El objetivo de este método es el de obtener bajos tiempos de producción y, al contrario, lograr una eficiencia de diseño alta, para reducción de costos y productos finales satisfactorios.

El disminuir el tiempo de producción, a su vez, aumenta significativamente el porcentaje de eficiencia de diseño, es por eso que en esta tesis se trabajará con la disminución de estos tiempos; del análisis realizado a la mano CDMIT se realizó la siguiente gráfica para poder resaltar los procesos que resultan más complejos y por tanto toman un mayor tiempo:

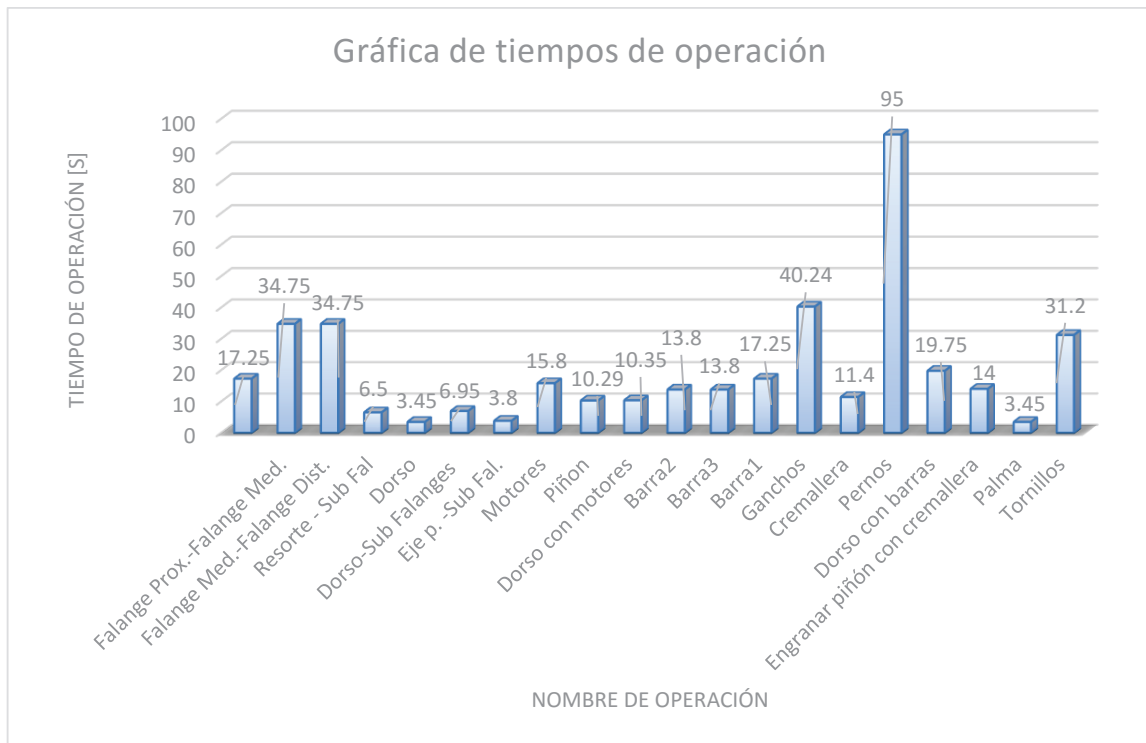


Fig. 21 Gráfica de tiempos obtenidos de cada subensamble.

Como se puede observar en la tabla anterior, la operación que aumenta significativamente el proceso de ensamble de la mano es realizar la inserción de pernos, principalmente para la unión de los 5 mecanismos de 4 barras que permiten el movimiento de los dedos; esto se debe principalmente a que este tipo de piezas resultan ser tan pequeñas, del orden de unos cuantos milímetros, que puede ocasionar que caigan fácilmente de la mano o sea más difícil colocar en su lugar, incluso puede ser necesario el uso de un lente de aumento que facilite la visibilidad, el omitir simplemente estos componentes puede resultar en una disminución y aumento significativo del tiempo de operación y de la eficiencia de diseño respectivamente.

El siguiente proceso con un tiempo relativamente grande de operación es la unión de los ganchos con las cremalleras, este proceso tiene, en las tablas de método, un tiempo bastante alto debido a que, para realizar esta unión, primero es necesario colocar las piezas en el lugar deseado y una vez logrado esto se procede a colocar un pequeño cordón de soldadura para la unión de ambas piezas metálicas, este proceso se lleva a cabo 3 veces.

Los siguientes procesos que obtuvieron un tiempo relativamente alto de operación, para los cuales puede resultar difícil lograr disminuir el tiempo, fueron las uniones de las falanges proximal, media y distal, se menciona que puede ser difícil de disminuir los tiempos debido a que, estas piezas, ya cuentan con un criterio de diseño que facilita su unión, el criterio utilizado es el uso de “snaps” que evitan el uso de piezas adicionales para su ensamble; de cualquier manera es un punto que se trabajará más adelante en esta tesis.

Observando la tabla, tenemos otra operación que resultó con un tiempo relativamente alto que puede ser fácilmente corregido, esta es la inserción de tornillos, operación que prácticamente cierra la mano, es decir, une la palma con el dorso, resulta con un tiempo alto debido a que primero es necesario colocar los tornillos en la posición deseada y después deben ser atornillados con una herramienta de ayuda, en este caso, un desatornillador.

Para lograr la disminución de tiempos en cada sub-ensamble considerado en párrafos anteriores, se hará uso de algunos criterios de diseño de los cuales ya se habló en este capítulo, éstos en especial son utilizados para corregir problemas de manejo de piezas.

Por otro lado existen ciertos problemas que surgieron una vez que la mano CDMIT fue manufacturada por primera vez y que es necesario corregir en este rediseño; uno de esos problemas fue la fractura del material en el área en donde los dedos son ensamblados al dorso, ésta ruptura puede deberse a principalmente a la geometría y el tamaño del área o que el ángulo o sentido de los rasters¹ fue la incorrecta, dicha ruptura puede verse en la Fig. 22.

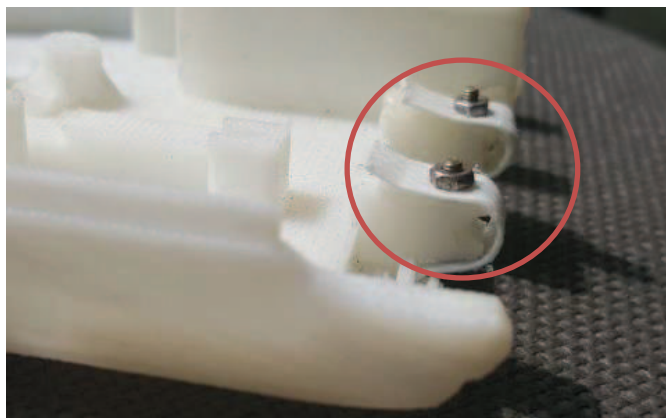


Fig. 22 Ruptura de soporte para ensamble de dedos

¹ Rasters: Hilos de material depositados mediante manufactura aditiva

Estas fracturas también se generaron en algunos soportes internos del dorso y de la palma, estos soportes evitan que los motores se muevan o salgan de su lugar, debido a que son completamente rectangulares, relativamente largos y los rasters están colocados de forma horizontal, éstos se fracturaron fácilmente, en la Fig. 23 puede apreciarse estos soportes, otra cosa que se puede apreciar es que no se dejaron espacios para los cables de los motores, estos espacios deben ser añadidos también.

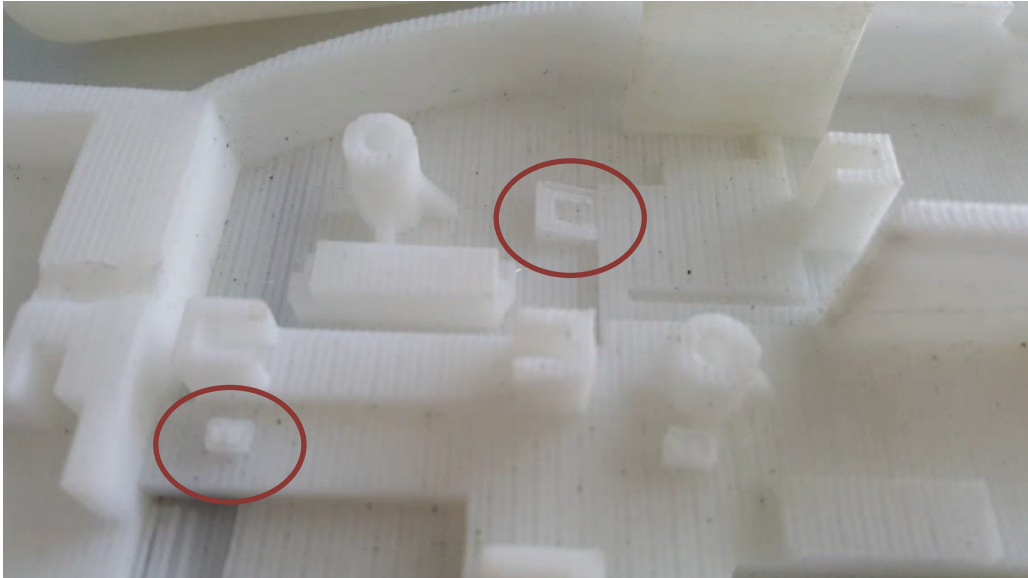


Fig. 23 Ruptura de otros soportes

Para que el mecanismo que mueve a cada dedo funcione y se mueva de manera correcta, es necesario que los eslabones que lo conforman se mantengan fijos, es decir, que éstos no deslicen sobre los pernos en los que están sujetos, este es un problema que surgió también en el momento de accionar la mano, también debe ser corregido Fig. 50.



Fig. 50 Movimiento de mecanismo sobre eje

Capítulo 4. Propuestas para rediseño, Pasos para ensamble y Segundo cálculo de tiempos de ensamble

4.1 PROPUESTAS PARA REDISEÑO

Con los resultados obtenidos, después de realizar el análisis de diseño para ensamble a la mano CDMIT, fue posible conocer las áreas en que se está teniendo problemas y aumentando el tiempo de ensamble, con esto es posible ahora realizar una serie de propuestas las cuales harán que este ensamble tenga una mayor eficiencia y se logre de una manera más rápida y sencilla.

Propuestas hechas por diseñadores del diseño original (Flores, 2007):

- **Ángulo de los dedos:** Los dedos de la mano actualmente se encuentran completamente paralelos entre ellos lo que no ocurre en una mano humana, el diseño actualmente planteado de la palma se hizo con la consideración de que la línea de flexión de los dedos era paralela a la línea del antebrazo, sin embargo dado que la mano no flexiona los dedos de esa forma se recomienda que la línea de flexión de los dedos converja en la muñeca, ésta es una recomendación mencionada en trabajos a futuros de la mano CDMIT en su diseño original.
 - Pros: El generar un ángulo entre los dedos puede ser una ventaja para realizar una mejor combinación de los movimientos de los dedos y que la prensión de la mano sea más natural
 - Contras: No encontrados.
- **Reacomodo de motores:** Uno de los problemas que surgieron al poner en funcionamiento la mano en su diseño original, fue que el movimiento no se llevaba de forma adecuada debido a que los motores estaban a diferentes alturas, esto hacía que el gancho que unía al motor con el mecanismo tuviera cierto ángulo de inclinación.
 - Pros: Mejora del funcionamiento de motores y mecanismos.
 - Contras: Puede ser necesario un espacio mayor en la palma para el reacomodo de motores lo que puede comprometer la forma natural deseada.
- **Mecanismo:** Una propuesta de trabajo a futuro del diseño original de la mano, fue que, los eslabones del mecanismo contaran con uniones integradas a éstos con la finalidad de eliminar la necesidad de pernos considerando así el criterio de diseño de “Manejo” que propone Boothroyd (Boothroyd, 2005), con relación al mecanismo, también se propuso como trabajo a futuro que, todos los eslabones queden perfectamente cubiertos con la carcasa.
 - Pros: Reducción de tiempo de ensamble, mejor presentación de la mano.
 - Contras: Es necesario un análisis para asegurar que estas uniones integradas a las piezas no fallen y se fracturen.

Propuestas hechas en el presente trabajo:

- **Pernos y tornillos:** La principal reducción de tiempo que se logrará en la mano será a partir de reducir el número de pernos y tornillos en ella, estos pernos y tornillos se encuentran principalmente en el mecanismo de cada dedo, teniendo tres pernos por dedo nos arroja 15 pernos tan sólo en los dedos, los demás se encuentran en la palma y dorso y permiten que estas no se separen, para eliminarlos se generarán “snap fit”, utilizando así el criterio de diseño “Manejo” y “Disminución de piezas” establecido por Boothroyd (Boothroyd, 2005).

Los “snap fit” son aquellos elementos de unión los cuales se manufacturan en la misma pieza a la cual se le desea unir una segunda sin necesidad de un tercer elemento, estos elementos sustituirán los pernos actuales, se realizará un análisis para saber si éstos realmente soportan los esfuerzos sin llegar a fracturarse.

Los elementos que unen las falanges de todos los dedos ya cuentan con ese elemento integrado, lo que elimina los pernos en estas uniones, estos elementos se dejarán tal cual se encuentran actualmente.

- Pros: Reducción considerable del tiempo de ensamble final.
 - Contras: Si el material que reemplazará los pernos no resiste a los esfuerzos generados durante el movimiento, éstos pueden fracturarse.
-
- **Corrección de rasters:** Actualmente en la mano analizada existe una serie de defectos y fallas relacionados con el acomodo de los rasters. Los rasters es la forma en que la máquina de manufactura aditiva va colocando el material, si éste no es colocado adecuadamente y las líneas de material se encuentran perpendiculares a una fuerza, éstos seguramente se romperán.

Por esta razón se hará un análisis detallado de la colocación del material si se decide que la mano sea fabricada por manufactura aditiva.

- Pros: Evitar que el material falle y se fracture debido a la colocación de material.
 - Contras: Este análisis sólo se llevará a cabo si se decide que la mano se fabrique mediante este proceso.
-
- **Palma y dorso:** Una propuesta más para la reducción del tiempo de ensamble es la de crear una sola geometría para el dorso y la palma, es decir, que éstas no estén conformadas por ambas piezas, en manos comerciales como la BeBionic se utiliza este diseño que permite un fácil acceso a la parte interna de la mano sin la necesidad de realizar un desensamble complicado.

- Pros: Reducir significativamente el tiempo de ensamble reduciendo piezas y a la vez tornillos, fácil acceso a los componentes interiores de la mano.
 - Contras: Puede ocasionar una dificultad al momento de que los motores sean ensamblados.
- **Unión de ganchos y cremalleras:** Otro inconveniente encontrado después de realizar el análisis de ensamble fue, que el gancho que une el mecanismo de los dedos a los engranes se encuentra soldado, esta presenta una operación extra un tanto lenta y complicada a la hora de realizar el ensamble, lo deseable en este caso es que, ya que esas piezas no generan movimientos entre ellas, reducir las a una pieza única o generar una unión tipo “snap fit”.
- Pros: Disminución considerable del tiempo.
 - Contras: La reducción de dos piezas a una puede generar que su manufactura sea complicada.
- **Movilidad de mecanismo:** En la mano actual, al momento en que ésta efectúa algún tipo de movimiento, los eslabones del mecanismo deslizan sobre el soporte en que se encuentran generando mayores esfuerzos en el motor y un movimiento no deseado de los dedos, es por esto, que se propone generar geometrías que impidan este movimiento, éstas se diseñarían directamente sobre el soporte de los mismos.
- Pros: Evitar deslizamiento de los eslabones del mecanismo.
 - Contras: No se encontraron.
- **Conexiones:** En la manufactura del diseño original, al colocar los motores, la carcasa no contaba con espacios adecuados en donde pudieran colocarse los cables y conexiones de los motores, debido a esto, a la carcasa se le tuvieron que hacer una serie de barrenos para que los cables pudieran salir, la propuesta en este caso es generar estos barrenos desde un inicio y también hacer el diseño de canaletas en las cuales puedan estar estos cables sin causar un enredo entre ellos y otras piezas.
- Pros: Evitar el uso de operaciones posteriores para generar barrenos, evitar que los cables estorben o se enreden con otros elementos.
 - Contras: No se encontraron.

Propuestas hechas por autora del primer análisis de ensamble:

- **Facilidad de ensamble en falanges:** Una propuesta hecha en la tesis de licenciatura en donde se realizó un primer análisis para ensamble a la mano CDMIT, fue el de agregar una serie de “rampas” en las uniones en dónde se ensamblan las falanges, criterio de diseño “Posicionamiento” establecido por Boothroyd (Boothroyd, 2005), esto permite que el perno deslice por la rampa para poder finalmente asentarse dentro del agujero, esto puede disminuir los tiempos de ensamble de manera regular ya que no es un punto crítico en los resultados del análisis del diseño original.
 - Pros: Mejorar la facilidad de ensamble de las falanges.
 - Contras: El reducir el espesor puede causar fractura de la unión.

4.2 PASOS PARA ENSAMBLE (REDISEÑO)

En este apartado de establecerán los pasos para realizar el análisis de ensamble de las 45 piezas obtenidas después de las propuestas de rediseño, como se mencionó anteriormente, debido a que no se realizó el ensamble físico de todas las piezas, estos pasos son propuestos con ayuda de uno de los diseñadores del diseño original de la mano.

El proceso propuesto que se siguió para el análisis de ensamble del rediseño de la mano CDMIT fue el siguiente:

1. Inserción de falange proximal con falange medial, este proceso se lleva a cabo cuatro veces para los cuatro dedos: índice, medio, anular y meñique.
2. Al paso 1, insertar las falanges distales, este proceso se lleva a cabo cinco veces para los cinco dedos: índice, medio, anular, meñique y pulgar. Con este paso se tiene completo el *Sub-ensamble Falanges*.
3. Insertar el resorte del pulgar en la pieza que corresponde al Metacarpiano de ésta, este paso se llevará a cabo una vez.
4. Insertar *Sub-ensamble Falanges* en el dorso, este proceso se lleva a cabo cinco veces para los cinco dedos de la mano. Con este paso se tiene completo el sub-ensamble *Dorso-Sub-ensamble Falanges*.
5. Insertar el eje de rotación del dedo pulgar para asegurar la inserción del dedo con el dorso y que éste pueda actuar como bisagra.
6. Alinear el eje de cada uno de los tres piñones con el eje de tres de los cuatro motores (uno quedará libre ya que pertenece al dedo pulgar) e insertar ambas partes para generar el *Sub-ensamble Motor-Piñón*.
7. Insertar los tres *Sub-ensamble Motor-Piñón* en el dorso y el motor del dedo pulgar, el motor del dedo pulgar debe ser insertado en el dorso y se debe alinear y posteriormente insertar el eje del motor con el eje del pulgar. Con este paso tendremos el *Sub-ensamble Dorso - Motores*.
8. En estos cuatro pasos siguientes se realizará la unión de barras del mecanismo de los dedos, en primer lugar se alinearán la barra 3 con la barra 2 haciendo coincidir el barreno con su snap-fit correspondiente insertándolo enseguida, este paso cinco veces para las barras 2 y 3 de los cinco dedos.
9. Al paso anterior agregar la barra 1, esto se logra alineando el barreno de la barra 1 y la barra 2 con su snap-fi correspondiente e insertándolo enseguida, realizar este paso cinco veces para los cinco dedos.
10. Insertar el gancho con cremallera en el extremo de la barra 1 alienando el barreno con su snap-fit correspondiente, realizar este paso cuatro veces para los tres dedos (índice, medio y meñique). Para el caso de la cremallera de los dedos anular y meñique insertar ambos ganchos en la cremallera que tienen en común. Con estos pasos se generará el *Sub-ensamble Barras*.

11. En este paso se realizará la unión del *Sub-ensamble Falanges* con el *Sub-ensamble Barras*, para cada *Sub-ensamble Falange* alinear su respectivo *Sub-ensamble Barras*, alienar barrenos con snap-fits correspondientes e insertar, realizar esta operación cinco veces para los cinco dedos. Con este paso se generará el *Sub-ensamble Dorso - Barras*.
12. Para la unión final del *Sub-ensamble Dorso - Barras* es necesario engranar la cremallera con su respectivo piñón, este paso se llevará a cabo tres veces.
13. Colocar la tapa de la palma en su lugar y asegurar con el snap-fit.

Con este último paso se tiene la mano CDMIT rediseñada completamente ensamblada.

4.3 SEGUNDO CÁLCULO DE TIEMPOS DE ENSAMBLE

Una vez que establecimos las propuestas de rediseño, es posible saber que tanto se logra mejorar la eficiencia de ensamble así como que tanto tiempo se puede reducir el tiempo de ensamble total y de cada subensamble, para ello, se hicieron los cálculos por separado de cada mejora en la tabla de diseño para ensamble y se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Snap fit en barras:** El unir las barras del mecanismo por medio de snap fit o uniones integrales reduce el tiempo de ensamble total ya que se eliminan los 10 pernos que se usan actualmente, la eficiencia de ensamble no aumenta considerablemente pero el tiempo total de ensamble pasa de 403.8 [s] a 378.8 [s] y la eficiencia de 12.63% a 13.46%.

Número de pieza	Número de veces que la operación se lleva a cabo	Código de dos dígitos de manipulación manual	Tiempo de manipulación manual	Código de dos dígitos de inserción manual	Tiempo de inserción por parte	Tiempo de operación (s)	Estimación teórica de la mínima cantidad de piezas	Nombre de pieza	Nombre del ensamble	α	β	$\alpha+\beta$
11	4	30	1.95	01	2.5	17.8	1	Barra 3	Barra2	360	360	720
12	4	30	1.95	01	2.5	17.8	1	Barra 2	Barra3	360	360	720
13	5	30	1.95	01	2.5	22.25	1	Barra 1	Barra1	360	360	720
								TM [s]	NM	Eficiencia	%	
								378.8	17	0.134642801	13.46428006	

- **Snap fit en soportes de mecanismo:** Actualmente el mecanismo de cada dedo es soportado por pernos que atraviesan cada falange, estos pernos también aumentan críticamente el tiempo de ensamble total, es por eso que una de las propuestas es generar uniones integrales en cada falange que pueda soportar los mecanismos y así prescindir de estos 15 pernos, al conjugar este rediseño con el anterior se eliminaron los 25 pernos totales, con esto se pasa de un tiempo total de ensamble de 403.8 [s] a 321.8 [s] y la eficiencia de 12.63% a 15.84%

16	0	11	1.8	30	2	0	0	Pernos	Pernos	180	0	180
								TM [s]	NM	Eficiencia	%	
								321.8	17	0.158493381	15.84933806	

- **Sustitución de tornillos:** Para que la palma ensamble con el dorso y cierre el acceso al interior de la mano actualmente se hace uso de 4 tornillos los cuales implican el uso de herramienta y procesos extra para ser ensamblados, en esta parte se contempla que sean reemplazados por snap-fit en ciertos puntos del borde del dorso para evitar estas operaciones extras, al hacer esta modificación con las anteriores obtenemos que el tiempo de ensamble total pasa de 403.8 [s] a 291.1 [s] y la eficiencia de 12.63% a 17.52%

19	1	30	1.95	30	2	3.95	1	Palma	Palma	360	360	720	
20	0	11	1.8	38	6	0	0	Tornillos	Tornillos	360	0	360	
									TM [s]	NM	Eficiencia	%	
									291.1	17	0.175209564	17.52095644	

- **Eliminación de soldadura:** Para la unión que existe entre el gancho que jala el mecanismo y la cremallera actualmente se realiza mediante soldadura, este post-proceso incrementa el tiempo de ensamble total debido a que es necesaria una operación extra que lleva un mayor tiempo y complicaciones, es por eso que en las propuestas de rediseño se consideró que ésta fuera una sola pieza, con esto de pasa de 6 pieza a sólo 3, con esta modificación y con las anteriores se tiene un tiempo total de ensamble de 267.1 [s] y una eficiencia de 19.1 %

14	4	13	2.06	30	2	16.24	0	Ganchos	Ganchos	0	360	360
									TM [s]	NM	Eficiencia	%
									267.1	17	0.190954021	19.09540213

- **Facilidad de ensamble de falanges:** La unión de las falanges puede llegar a ser un poco complicada a pesar de que estas cuentan con snap-fit, esto aumenta también el tiempo total de ensamble pero, con una mínima modificación, podemos reducir este tiempo, simplemente agregando canales para que la alineación sea más fácil de lograr, con esto y con las modificaciones anteriores se obtiene un tiempo total de ensamble de 234.1 [s] y una eficiencia de ensamble de 21.78%.

1	5	30	1.95	00	1.5	17.25	1	Falange proximal		360	360	720
2	5	30	1.95	30	2	19.75	1	Falange medial	Falange Prox.- Falange Med.	360	360	720
3	5	30	1.95	30	2	19.75	1	Falange distal	Falange Med.- Falange Dist.	360	360	720
									TM [s]	NM	Eficiencia	%
									234.1	17	0.217874231	21.7874231

4.4 Tabla de diseño para ensamble re-calculada con rediseño aplicado:

Número de pieza	Número de veces que la operación se lleva a cabo	Código de dos dígitos de manipulación manual	Tiempo de manipulación manual	Código de dos dígitos de inserción manual	Tiempo de inserción por parte	Tiempo de operación (s)	Estimación teórica de la mínima cantidad de piezas	Nombre de pieza	Nombre del ensamble	α	β	$\alpha+\beta$
1	5	30	1.95	00	1.5	17.25	1	Falange proximal		360	360	720
2	5	30	1.95	30	2	19.75	1	Falange medial	Falange Prox.- Falange Med.	360	360	720
3	5	30	1.95	30	2	19.75	1	Falange distal	Falange Med.- Falange Dist.	360	360	720
4	1	10	1.5	30	2	3.5	1	Resorte pulgar	Resorte - Sub Fal	180	180	360
									Sub Falanges			
5	1	30	1.95	00	1.5	3.45	1	Dorso	Dorso	360	360	720
6	1	30	1.95	31	5	6.95	1	Sub Falanges	Dorso-Sub Falanges	360	360	720
7	1	11	1.8	30	2	3.8	1	Eje pulgar	Eje p. -Sub Fal.	0	360	360
8	4	30	1.95	00	2	15.8	1	Motor	Motores	360	360	720
9	3	01	1.43	30	2	10.29	1	Piñón en manip y el ensamble en inserción	Piñón	180	0	180
									sub motor-piñón			
10	3	30	1.95	00	1.5	10.35	1	Sub motor-piñón	Dorso con motores	360	360	720
11	4	30	1.95	01	2.5	17.8	1	Barra 3	Barra2	360	360	720
12	4	30	1.95	01	2.5	17.8	1	Barra 2	Barra3	360	360	720
13	5	30	1.95	01	2.5	22.25	1	Barra 1	Barra1	360	360	720
14	4	13	2.06	30	2	16.24	0	Ganchos	Ganchos	0	360	360
15	3	20	1.8	30	2	11.4	1	Cremallera	Cremallera	360	180	540
16	0	11	1.8	30	2	0	0	Pernos	Pernos	180	0	180
									Sub Barras			
17	5	30	1.95	30	2	19.75	1		Dorso con barras	360	360	720
18	4	10	1.5	30	2	14	1		Engranar piñón con cremallera	180	180	360
19	1	30	1.95	30	2	3.95	1	Palma	Palma	360	360	720
20	0	11	1.8	38	6	0	0	Tornillos	Tornillos	360	0	360
						TM [s]	NM	Eficiencia	%			
	Piezas	45				234.1	17	0.217874231	21.7874231			

Capítulo 5. Cálculo de Snap-Fit, Modelado en CAD y Posiciones para sujeción de objetos.

5.1 CALCULO DE SNAP-FIT

Criterios

Para poder realizar el cálculo correcto de un snap-fit primero es indispensable conocer más acerca de esta unión, un buen cálculo del mismo evitará que las piezas a unir se separen fácilmente o por el contrario que sea muy difícil de desensamblar, también es necesario conocer las fuerzas que actúan sobre él.

El snap-fit, en general, puede ser diseñado con las consideraciones de dimensión que al diseñador le parezcan correctas para la pieza a ensamblar, sin embargo es necesario considerar ciertas proporciones para que el diseño sea aceptable.

La regla principal es la razón o proporción que existe entre la longitud del snap con respecto a su espesor, esta proporción debe de estar cerca de 5:1 y puede variar así hasta 10:1, siendo 5:1 la razón más apropiada y 10:1 es usada para piezas que se ensamblan y desensamblan muchas veces. Si se encuentra por debajo de 5:1, la base podría sufrir de esfuerzo puro y ésta llegaría a romperse, mientras que una proporción mayor a 10:1 puede generar una falta de fuerza de retención.

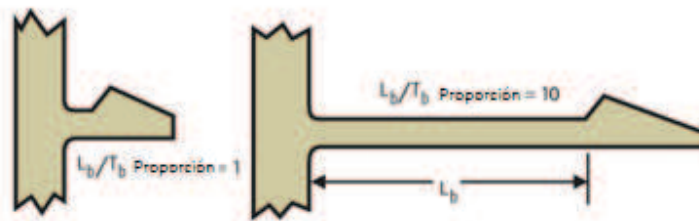


Fig. 24 Proporción entre largo y espesor
<http://steinwall.le8.getliveedit.com/pages/DesignforSnaps>

Un snap poco robusto en la parte baja de la pendiente principal, puede hacer que la pieza se rompa ya que al ser desviado o “doblado” se generan una gran cantidad de esfuerzos en su base, una forma de disminuir estos esfuerzos es generando una curva la cual los distribuya uniformemente.



Fig. 25 Eliminación de acumulación de esfuerzos
<http://steinwall.le8.getliveedit.com/pages/DesignforSnaps>

Por otro lado, los ángulos de entrada principal del snap, deben ser lo más pequeños que sea posible para reducir la fuerza necesaria para lograr un enganche, un ángulo de entre 25 a 40 grados resulta aceptable, mientras que uno igual o superior a 45 grados puede generar dificultades en el ensamble.

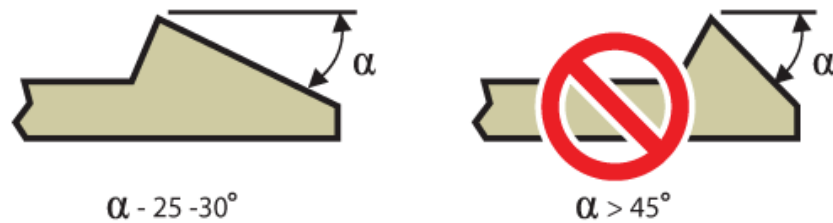


Fig. 26 Ángulo principal

<http://steinwall.le8.getliveedit.com/pages/DesignforSnaps>

La fuerza de retención del snap, puede manipularse para que ésta sea mayor o menor, ésta depende del ancho de la cara de retención, ésta determina qué tanto debe “doblarse” el snap; en general si la proporción del ancho y el largo del snap es de 5:1, entonces el ancho de la cara de retención será menor que el espesor, en cambio, si la proporción es cerca de 10:1 el ancho de retención será igual al espesor.

La fuerza de retención también puede ser modificada cambiando el ángulo de regreso, si este ángulo está entre 80 y 90 grados la fuerza necesaria para desensamblar será muy grande, si este ángulo se encuentra entre 55 y 80 grados la fuerza necesaria para el desensamble será media a poca y por último, si ésta está por debajo de los 45 grados entonces no se requiere de fuerza para el desensamble.

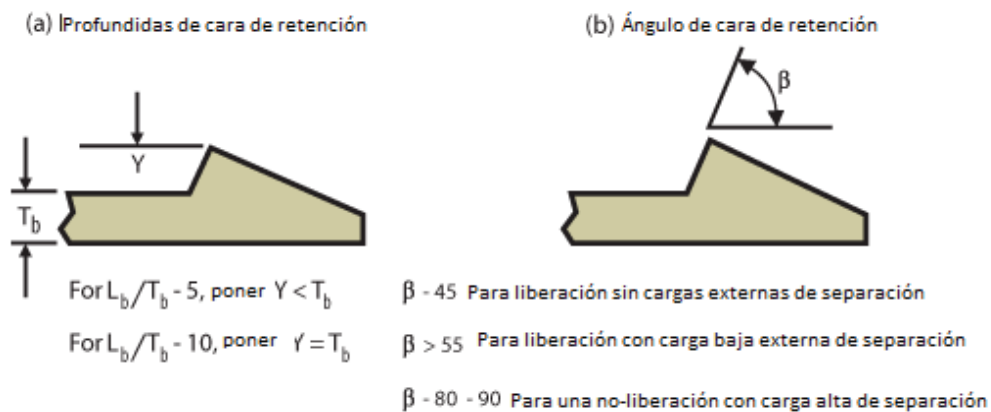


Fig. 27 Ángulo de regreso

<http://steinwall.le8.getliveedit.com/pages/DesignforSnaps>

5.2 PROPUESTA PARA ANÁLISIS PARA SNAP TIPO PIN

Los snap-fit tipo pin hacen la función de unir eslabones y permitir la rotación entre éstos. Por la configuración del ensamble, el principal problema es el esfuerzo cortante al que estarán sometidos. Para ver este efecto considere la Fig. 47.

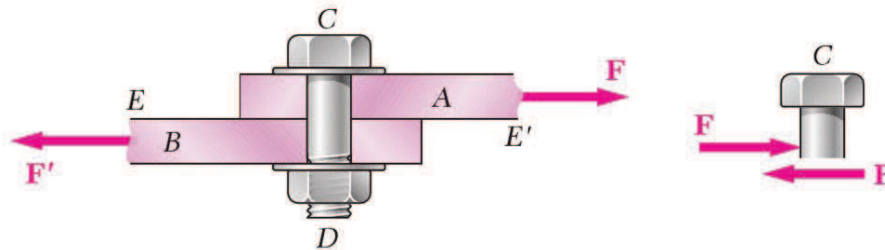


Fig. 47: Fuerzas en un perno de unión (Beer, 2013)

En la Fig. 47 se puede observar que cada eslabón ejerce una fuerza sobre el Snap-fit y que éstas están contenidas en un plano paralelo al plano transversal de éste; de aquí es claro que éstas fuerzas ocasionan un esfuerzo cortante.

Para poder diseñar correctamente la sección transversal es necesario estimar los valores máximos de las fuerzas que se transmiten en la articulación. Para determinar estas fuerzas es necesario contar con el análisis cinemático del mecanismo y para este último habrá que proponer un comportamiento de la posición, velocidad y aceleración de la cremallera en el mecanismo. Para cada posición de la cremallera se necesita resolver tanto velocidades (lineales y angulares) como aceleraciones (lineales y angulares) de los eslabones.

Con los datos calculados en el análisis cinemático del mecanismo es posible realizar un análisis dinámico del mismo. El análisis dinámico deberá realizarse tomando como base las leyes de Newton; un análisis Lagrangiano no es adecuado pues se requieren las fuerzas en las articulaciones para poder determinar los esfuerzos y este tipo de estudio se realiza en términos de energía. El análisis dinámico requiere tanto la aceleración lineal como la angular del centro de masa de cada eslabón y es por esto que el análisis cinemático se requiere en primer lugar.

En la Fig. 48 se presenta un diagrama de cuerpo libre de una de las barras. Para cada uno de los eslabones del mecanismo se debe generar uno en donde se reconozca cada fuerza y momento y, con ellos, plantear las ecuaciones de equilibrio dinámico. Se deberán resolver todos los sistemas de ecuaciones de forma conjunta.

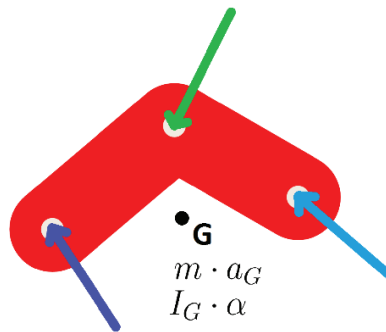


Fig. 48. Esquema del diagrama de cuerpo libre de una barra.

5.3 PROPUESTA CALCULO DE SNAP-FIT TAPA

Para el snap-fit que mantendrá la tapa unida al resto de la mano, se consideró usar un snap-fit tipo "U" ya que otro tipo sería menos apropiado de usar debido a la geometría que se tiene, para realizar el cálculo pertinente se propusieron las siguientes constantes teniendo como material propuesto el ABS, el cual de igual forma es propuesto como material base:

Y= Máxima deflexión requerida en la dirección de la fuerza

P= Fuerza

t= Espesor = 1.5 mm

Ravg= Radio= 2mm

ε= Máxima tensión

b= Ancho = 5mm

L1= 12mm

L2= 7mm

E= Módulo de flexión= 270000 psi= 1860.3MPa

I=Momento de inercia sección transversal rectangular= bt³/12

I= (0.005 [m]*0.0015[m])³/12 =3.51x10⁻¹⁷[m⁴]

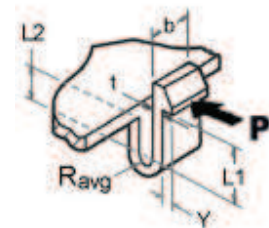


Fig. 45 Snap fit en forma de U
<http://snapfit4.cmg.net/>

$$\text{Ec. 1 } Y = \frac{P}{18EI} [6L_1^3 + 9R \{L_1(2\pi L_1 + 8R) + \pi R^2\} + 6L_2(3L_1^2 - 3L_1L_2 + L_2^2)]$$

Para todos los cálculos realizados a continuación se hizo uso del programa en línea snapfit4.

Para una deflexión de 1mm:

Snap-Fit Design Results Mar 11, 2015 7:28:13 PM

Force (P): 1.178 N

Material Properties

Grade: User Defined
Flexural Modulus: 1860 MPa

Snap Properties

Snap Type: U Shaped Beam - Case 1
Beam Width (b): 5 mm
Beam Thickness (t): 1.5 mm
Deflection (Y): 1 mm
Length (L1): 12 mm
Length (L2): 7 mm
Radius (R): 2 mm

----- End of Results -----

Para una deflexión de 4 mm:

Snap-Fit Design Results Mar 11, 2015 7:29:04 PM

Force (P): 4.714 N

Material Properties

Grade: User Defined
Flexural Modulus: 1860 MPa

Snap Properties

Snap Type: U Shaped Beam - Case 1
Beam Width (b): 5 mm
Beam Thickness (t): 1.5 mm
Deflection (Y): 4 mm
Length (L1): 12 mm
Length (L2): 7 mm
Radius (R): 2 mm

NOTE: Actual results from user defined material properties cannot be guaranteed.

----- End of Results -----

5.4 PROPUESTA CALCULO SNAP-FIT MECANISMO

Para el caso de los snap-fit que sujetan el mecanismo interior de los dedos se propone un snap-fit tipo pin, a continuación se muestra una propuesta de las posibles medidas estas uniones, éstos permiten que la pieza entre fácilmente en ellos con tan sólo un deslizamiento, para el desensamble es necesario aplicar fuerza en los costados para que éste libere lo que tiene en su interior, es por eso que éstos parecen ser adecuado para nuestro caso, ya que de esta manera el mecanismo quedará fijo.



Fig. 28 Snap-fit tipo pin

[<http://www.essentracomponents.fi/snap-lock-pin-slp25>]

Ya que este tipo de uniones son semejantes a un snap-fit en cantilever uniforme, podemos usar el mismo software para el cálculo de uno de ellos y con esto poderlo extrapolar al segundo, para el cálculo se tomaron en cuenta las siguientes posibles propiedades:

Y= Deflexión = **0.2mm**

P= Fuerza= 1N

t= Espesor = 0.8 mm

b= Ancho = 2mm

L= 2mm

E= Módulo de flexión= 270000 psi= 1860.3MPa

α' = Ángulo de regreso: 38 grados

α = Ángulo principal: 38 grados

- Dados los parámetros, fuerza necesaria para liberar el snap-fit:

Snap-Fit Design Results

Push-on force (W) when P unknown: **4.087N*2 = 8.174 N**

Material Properties

Grade: User Defined

Coef. of Friction: .25

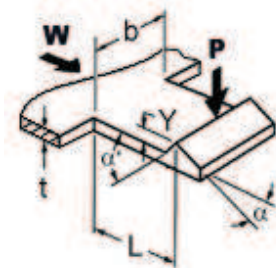


Fig. 46 Snap fit uniforme
<http://snapfit4.cmg.net/>

$$\text{Ec. 2 } V = P (\mu + \tan \alpha) / (1 - \mu \tan \alpha)$$

$$\text{Ec. 3 } W' = P (\mu + \tan \alpha') / (1 - \mu \tan \alpha')$$

$$\text{Ec. 4 } P = (bt^2 E \epsilon_0) / (6L)$$

Flexural Modulus: 1860.3 MPa

Yield Strain: 2%

Snap Properties

Snap Type: Type 5 Uniform Beam

Force (P): 3.969 N

Lead Angle (alpha): 38 deg

Beam Width (b): 2 mm

Beam Thickness (t): 0.8 mm

Beam Length (L): 2 mm

----- End of Results -----

- Dados los parámetros, fuerza necesaria para ajustar el snap-fit:

Snap-Fit Design Results

Push-on force (W) when P unknown: $5.087N \cdot 2 = 10.174 N$

Material Properties

Grade: User Defined

Coef. of Friction: .25

Flexural Modulus: 1860.3 MPa

Yield Strain: 2%

Snap Properties

Snap Type: Type 5 Uniform Beam

Force (P): 3.969 N

Lead Angle (alpha): 38 deg

Beam Width (b): 2 mm

Beam Thickness (t): 0.8 mm

Beam Length (L): 2 mm

----- End of Results -----

Como se puede apreciar en los cálculos anteriores, en la caso de los snap-fits que sostienen el mecanismo, la fuerza necesaria para insertarlos es menor que la fuerza necesaria para desensamblarlos, esto puede garantizarnos que estas piezas no se soltarán fácilmente al estar en funcionamiento.

Debido a las dimensiones con las que se está trabajando, a los snap-fits que se montarán en los eslabones se les darán las mismas constantes que se les dieron a los soportes, por lo tanto, los cálculos para éstos serán los mismos que para los soporte, con lo que se puede concluir que de igual forma, se necesitará una fuerza mayor para el desensamble que para el ensamble, lo que evitará que éstos de suelten fácilmente al momento de ser utilizados.

5.5 MODELADO EN CAD

Una vez seleccionado el rediseño de las piezas con puntos críticos, se realizó el siguiente paso el cual es realizar un modelo del mismo por medio de un modelador de sólidos, en este caso se seleccionó el software CATIA®, ya que cuenta con una gran cantidad de herramientas las cuales nos ayudan a conocer el comportamiento de la pieza final así como ciertas propiedades como peso, centro de masa, densidad, entre otras.

Para el modelado de la palma y dorso, se propuso una morfología la cual asemejase más la de una mano humana de un hombre adulto con las mismas dimensiones que el diseño original, en donde, las dimensiones correspondían, sin embargo, ésta no representaba estéticamente a una mano humana.

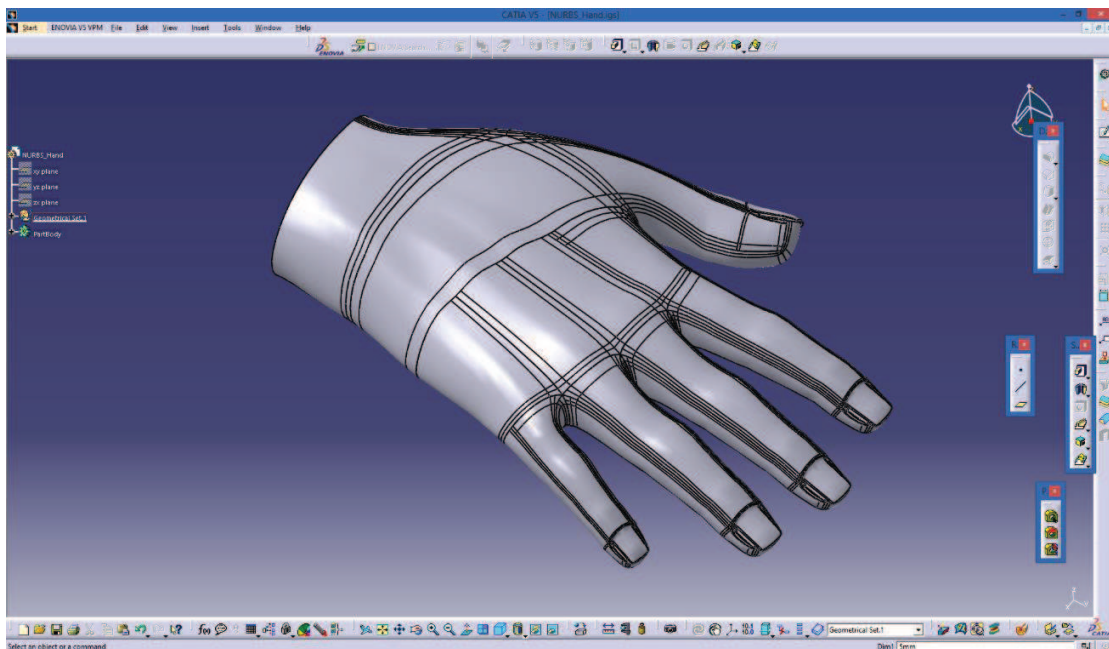


Fig. 29 Mano realizada por Mark Landsaat de grabcad.com

Para el uso de este modelo en CATIA® fue necesario exportarlo a un archivo .CATPart en superficies y posteriormente asignarle un espesor el cual finalmente fue de 3mm, una vez asignado se obtuvo un modelo sólido al cual se le realizó un corte para tener solamente la palma y dorso, eliminando así los dedos.

Para las falanges proximal, medial y distal de los dedos índice, medio, anular y meñique, se utilizó el diseño generado por alumnos del Centro de Diseño Mecánico; para la importación al programa con el que se trabajó, se realizó una operación parecida al de la mano anterior, éstos fueron importados como superficies y posteriormente se les asignó un espesor de 2.7mm, espesor recomendado por los mismos alumnos.

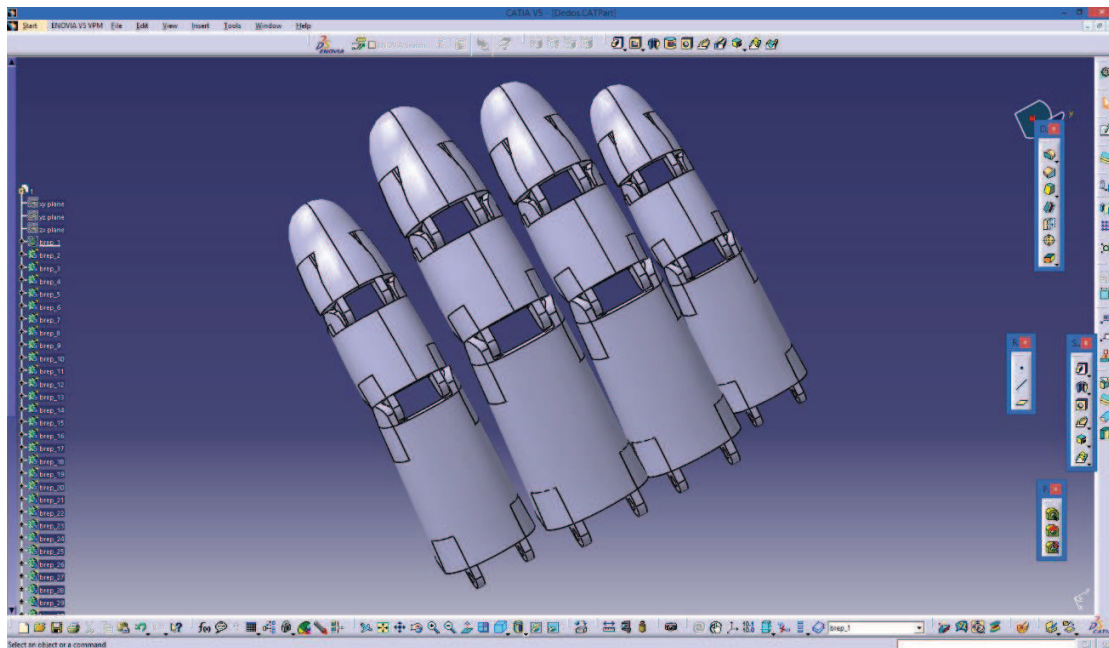


Fig. 30 Dedos importados a CATIA

Ya con las falanges listas para usarse en el software, se le agregaron los snap-fits para continuar el rediseño propuesto con el objetivo de retirar esos ocho pernos que funcionan como soporte de los mecanismos internos, para esto, en el área destinada a insertar los pernos soportes, en vez de dejar el orificio se generaron sólidos los cuales servirán como soportes integrales, es decir, incluidos desde la manufactura en la pieza.

Para las falanges proximal y distal del dedo pulgar así como el metatarsiano se decidió dejarlos tal como el diseño se encontraba originalmente, ya que, éste no presentó grandes problemas, este funciona simplemente como una bisagra, el único cambio que se le agregó fue la integración de los snap-fits para el mecanismo resorte que se encuentra en su interior.

Mejoras aplicadas recomendadas por autores del diseño original

- **Ángulo entre dedos**

La parte que funciona como soporte de toda la mano es el dorso, en esta pieza se encuentran los soportes de los dedos, estos soportes a diferencia de la mano original tienen un cierto ángulo unos con respecto a otros, esto se debe a que, morfológicamente, los dedos suelen

no moverse paralelamente si no que existe un ángulo entre ellos, en este caso se tomó un ángulo de entre 8° y 10° que resultó de una medición de una mano de un hombre adulto, otra razón del uso de esta separación es el evitar el roce de falanges. Esto podemos verlo en la Fig 36.

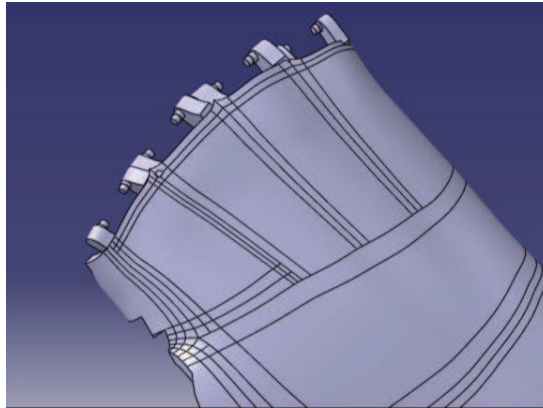


Fig. 36 Dorso con soportes para dedos.

Otra cosa que puede notarse en la figura anterior es que, se conservarán las uniones por medio de pernos integrados al dorso, éstos tendrán un cambio de diámetro apenas perceptible (diámetro mayor de 1.65 mm y menor de 1.364) para evitar que las falanges se desplacen en el eje del cilindro.

- **Reacomodo de motores**

Para los soportes de los motores se generaron cajas en la parte interna del dorso, como se tiene originalmente, éstos entran a presión, es decir, no se hace uso de pernos ni tornillos, ya que los motores a utilizar serán los mismos se conservaron esas dimensiones, la diferencia fue el reacomodo de los mismos, se trató de que ninguno estuviera traslapado y que el mecanismo de cremallera quedara lo más horizontal posible para evitar torceduras. Lo anterior se puede observar en la Fig 37. El espacio permitió el reacomodo de motores con cierto ángulo (ángulo mencionado anteriormente entre los dedos).

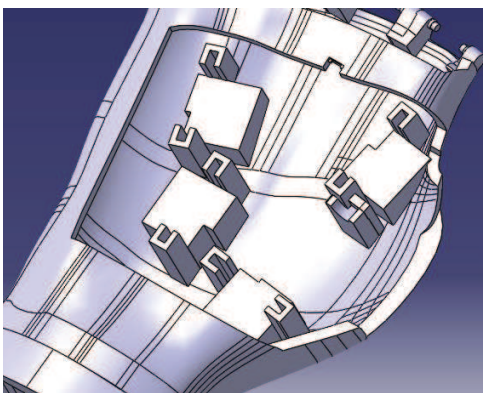
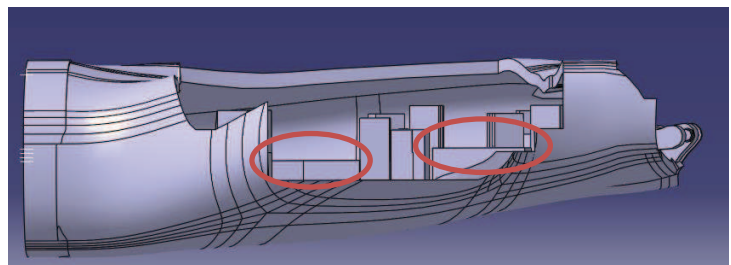


Fig. 37 a) Soportes para motores reorientados



b) Soportes paralelos al dorso

Mejoras aplicadas en el rediseño

- **Eliminación de pernos en mecanismo**

Por el lado de los mecanismos, una propuesta de trabajo a futuro de la tesis original de la mano CDMIT, fue el agregar estas uniones integrales a los eslabones, lo que permitiría eliminar los siguientes diez pernos que se utilizaban para esta unión, en este rediseño eso también fue considerado como uno de los puntos críticos ya que estas piezas incrementan seriamente el tiempo de ensamble, es por esta razón que se unieron como una pieza única.

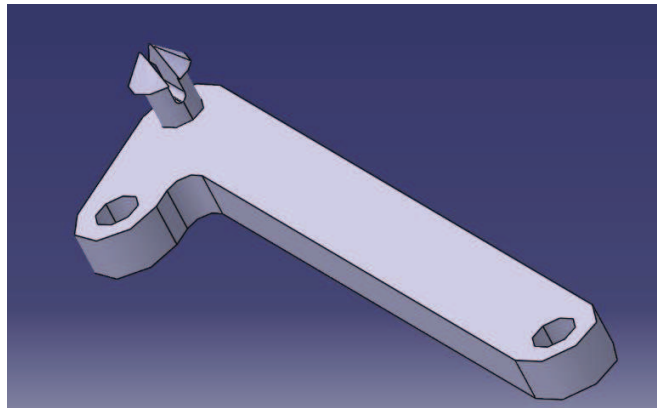


Fig. 49 Eslabón de mecanismo con snap-fit

- **Eliminación de pernos en soportes**

En las siguientes imágenes se muestra cómo fueron rediseñados los soportes de los mecanismos de cada dedo para la posible eliminación de estos pernos, en este rediseño también se elimina el problema de la movilidad de los eslabones sobre los ejes.

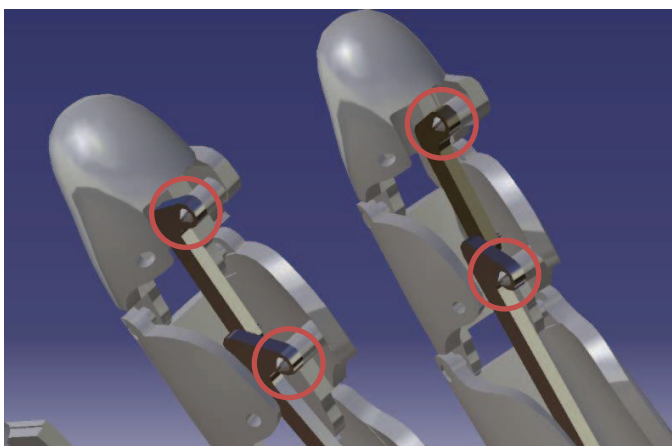
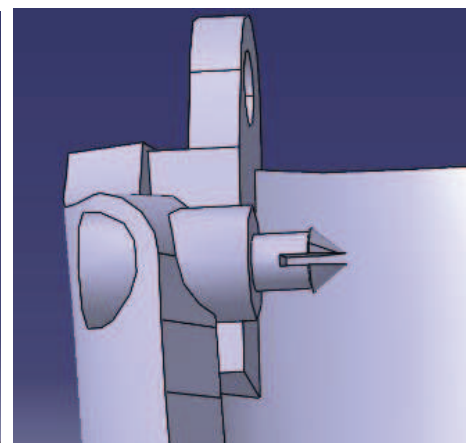


Fig. 31 a) Falanges y mecanismos con snap-fit ensamblados



b) Ampliación de snap fit

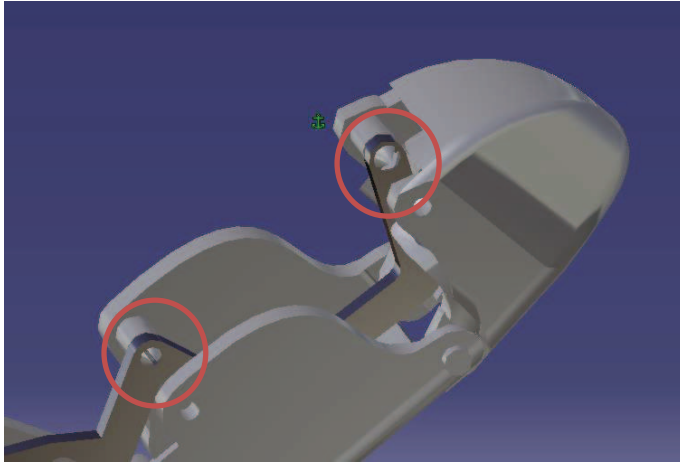
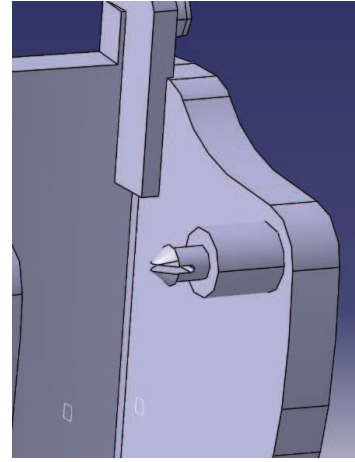


Fig. 32 a) Falanges y metatarsiano de pulgar con snap-fits



b) Ampliación de snap-fit

- **Eliminación de tornillos**

En el caso de la palma y dorso, como se mencionó en el apartado de propuestas de re-diseño, se ideó una solución para que el acceso a los motores y mecanismos fuera más rápido y fácil, ya que en el diseño actual es necesario quitar una serie de tornillos para poder hacerlo, en este caso se diseñó una tapa que irá en la parte de la palma.

Al igual que en el diseño actual, los soportes de los motores de encontrarán en la parte del dorso, el único cambio es que toda la zona de la palma podrá removerse completamente, ésta se sostendrá con ayuda de un snap fit muy parecido al que se encuentra en el área de las pilas de los controles remotos comunes

Esta tapa, además de evitar que objetos entren o salgan de la mano, también contará con soportes adicionales para evitar que los motores salgan de su lugar, así como canaletas que servirán de guía para que las barras de las cremalleras no cambien de dirección o se tuerzan evitando así que éstas se fracturen.

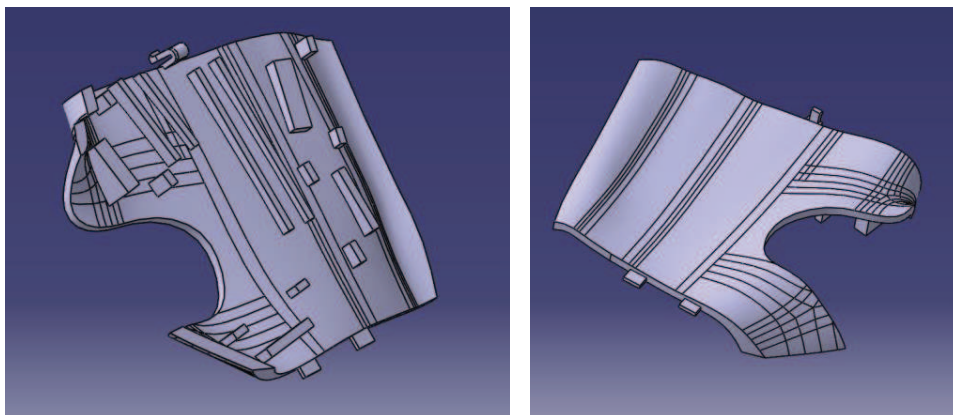


Fig. 35 Tapa con soportes

- **Eliminación de soldadura**

Para la eliminación del proceso posterior de soldadura en la unión del gancho con la cremallera, se decidió que éstas formaran una sola pieza, colocando canaletas en la palma y dorso se evitarán flexiones que hagan que la pieza se fracture, ya que es relativamente larga en comparación de su espesor.

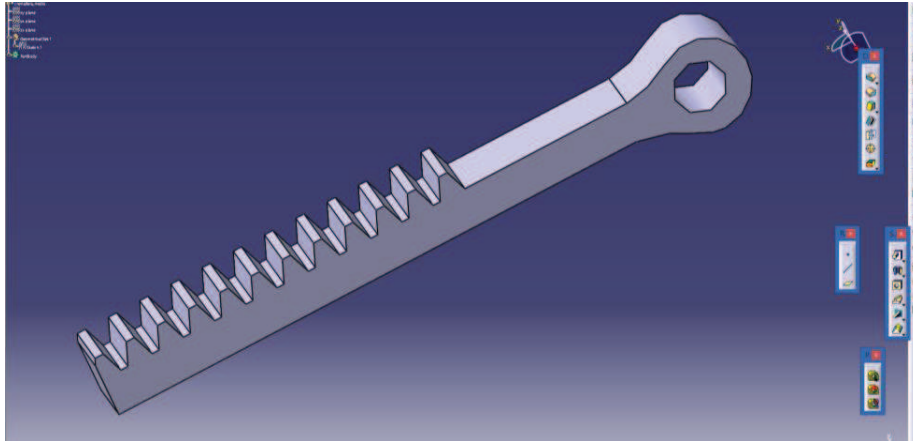


Fig. 33 Cremallera y gancho en una sola pieza

El perno largo que transmite el movimiento del motor del dedo meñique al anular se decidió dejar tal cual el diseño original, esto se debe a que si éste se fabrica como una sola pieza es muy posible que se rompa en la unión del cilindro con la cremallera y su manufactura llegaría a ser algo complejo por lo que se conservó la idea original del uso de un gancho de aluminio como se muestra a continuación:



Fig. 34 a) Perno largo anular



b) Perno largo anular ensamble

- Facilidad de ensamble falanges:

Como se mencionó en las propuestas de rediseño, el agregar una serie de “rampas” a las falanges en el área en dónde se ensamblan unas con otras hace que éstas sean fácilmente unidas lo que reduce el tiempo final de ensamble (Hernández, 2013), podemos ver el rediseño en la siguiente imagen.

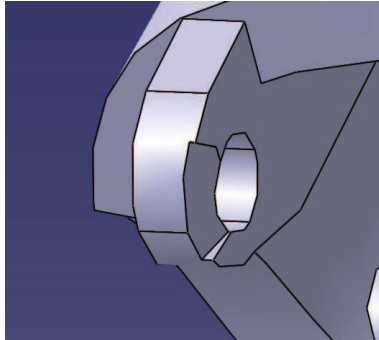


Fig. 51 Rampa para ensamble de falanges.

Ya que el pulgar no sería modificado, sólo se colocó el motor y por lo tanto el eje en el que gira el perno principal a forma de que estuviera acorde con los demás dedos, es decir, se posicionó de acuerdo a la morfología de la mano y de forma en que éste pueda generar los movimientos establecidos anteriormente (puño, gancho, etc.). También se abrió una caja en el dorso para que el movimiento del pulgar fuera libre y éste no chocara en ningún momento en los movimientos deseados.

En el CDMIT actualmente se está trabajando con una muñeca articulada, ésta reproducirá los movimientos realizados por una muñeca humana por medio de sensores y actuadores, es por esta razón que se incluyó un socket inicial al dorso, es decir, se cuenta con la idea de unir ambas partes, mano y muñeca, para que éstas trabajen juntas, sin embargo las especificaciones pueden cambiar es por eso que esta parte del trabajo se dejará abierta y sólo se contemplará la posibilidad, en la Fig. 38 se observa el socket.

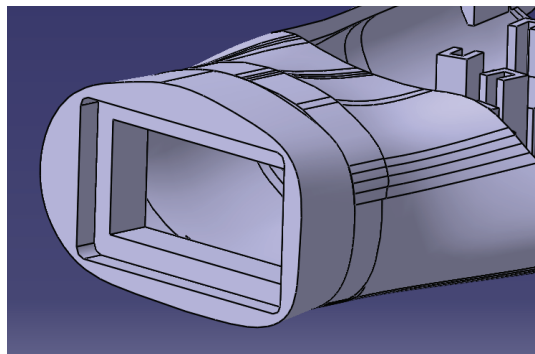


Fig. 38 Caja o socket para muñeca articulada.

A continuación se muestra el explosivo del ensamble final de la mano rediseñada, en la parte Anexos, serán agregados los planos de cada pieza.

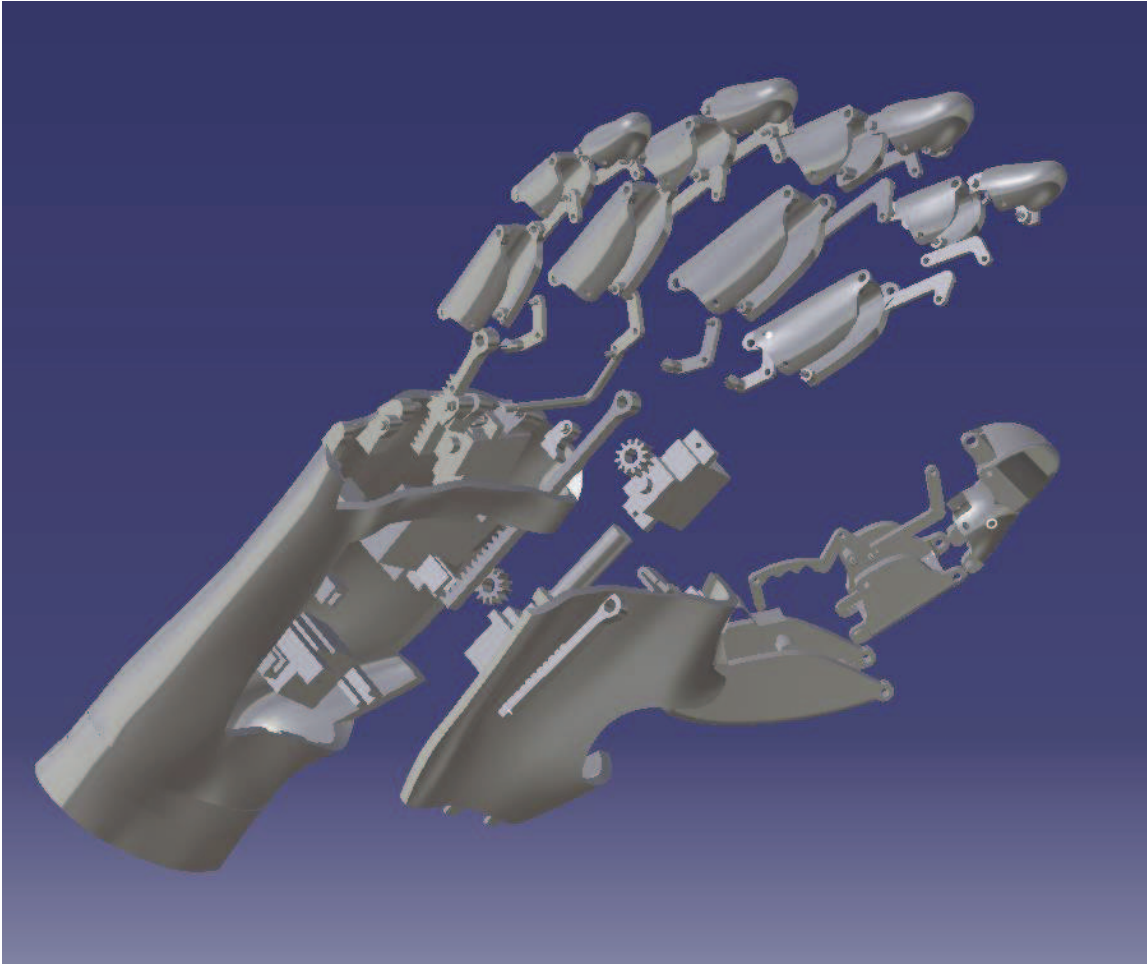


Fig. 49 Mano extendida Explosión

5. 6 POSICIONES PARA SUJECIÓN DE OBJETOS

En la mano original se propusieron tres posiciones principales, en este proyecto se respetaron esas posiciones que son: gancho, presión en punta con dedos y presión en punta fina, a continuación se muestra una simulación en CAD de cada una de éstas en la mano rediseñada.

Mano extendida: Esta es la posición de descanso, en la mano original todos los dedos se encontraban alineados con la horizontal, después de realizar una medición a la mano de un hombre adulto, se estableció una posición de descanso en donde los dedos tienen aproximadamente 28° con respecto a la horizontal.

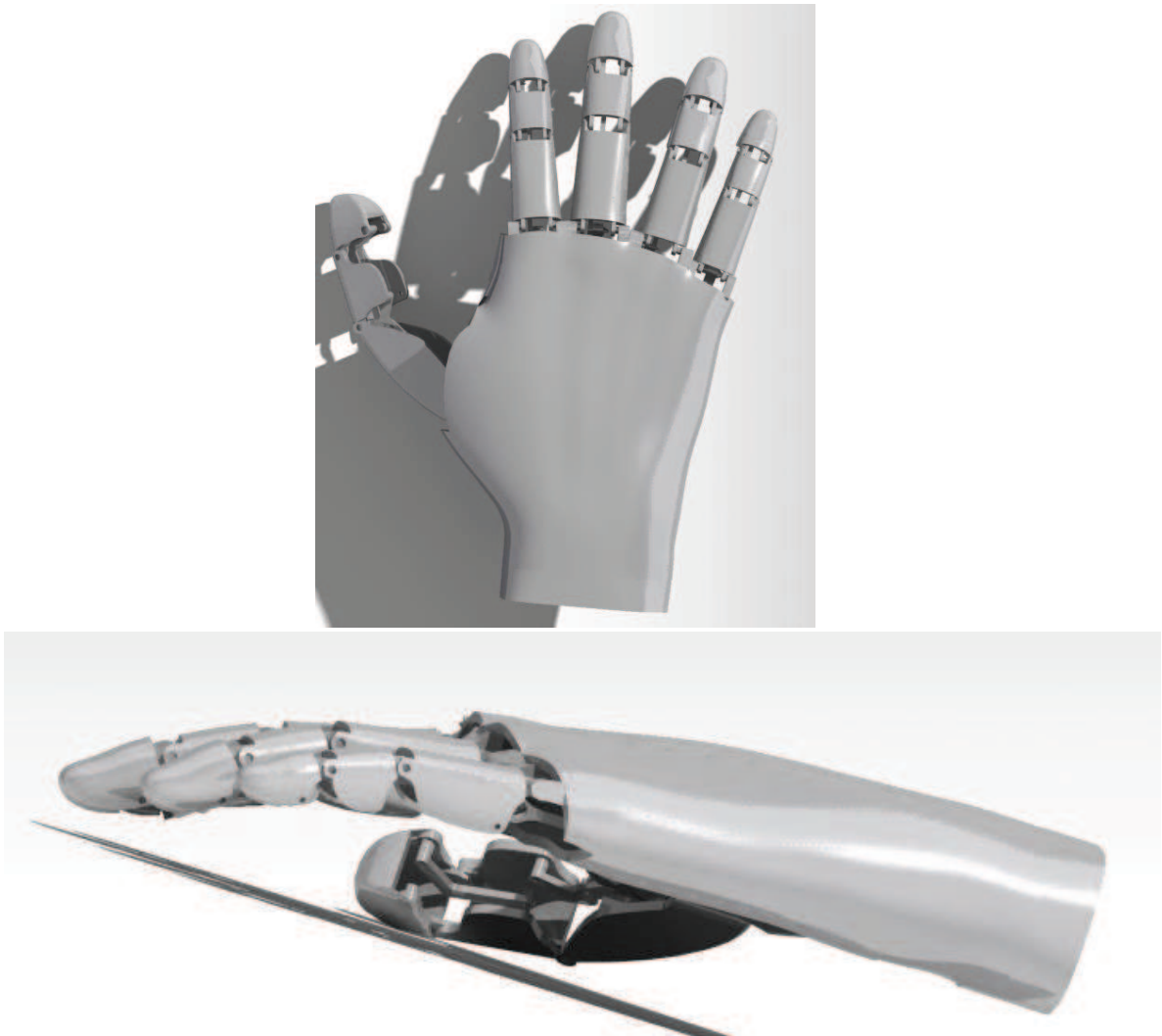


Fig. 39 Mano extendida

Puño:



Fig. 40 Mano en posición de puño 1



Fig. 41 Mano en posición de puño 2

Presión en gancho:

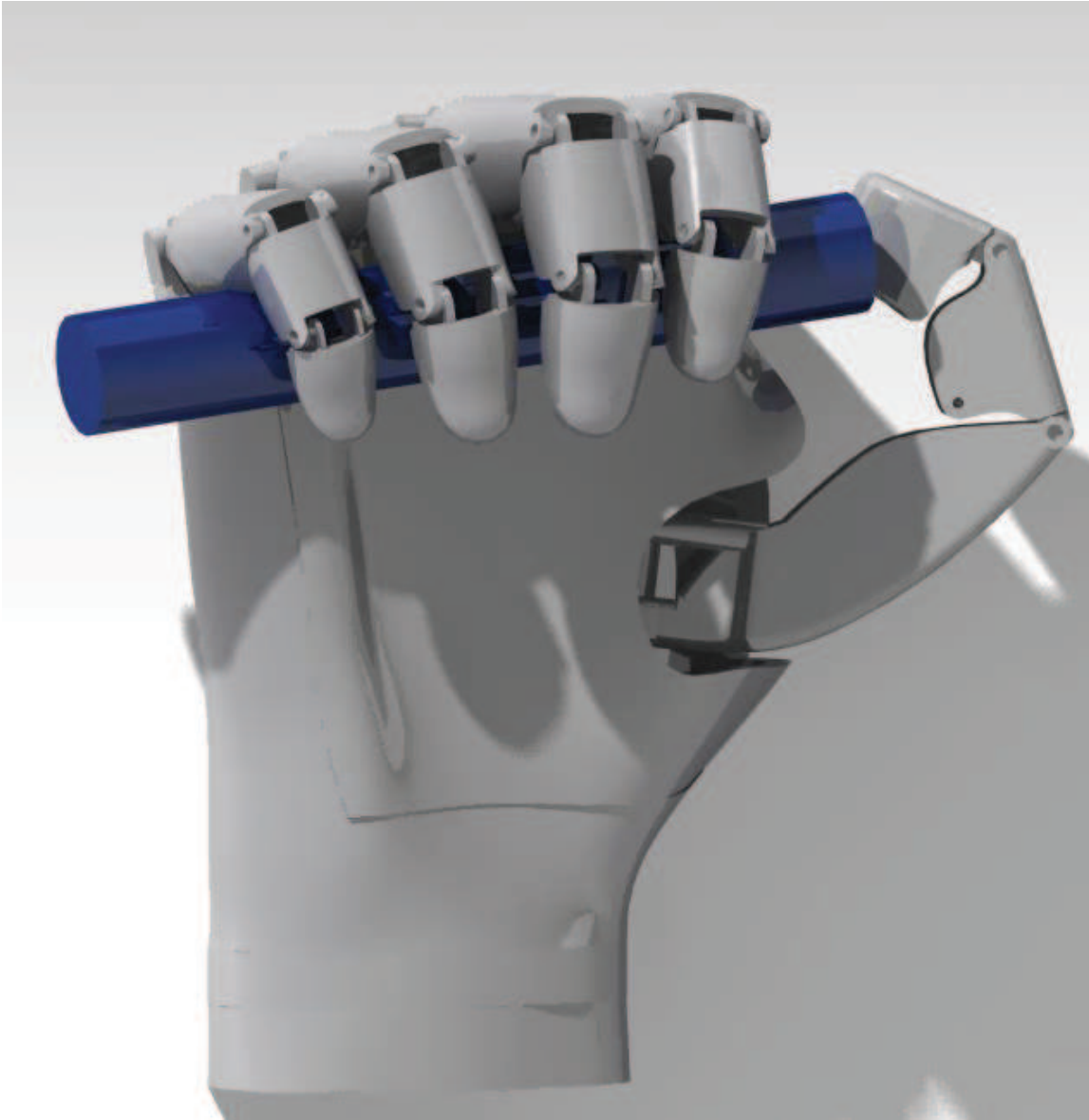


Fig. 42 Mano en posición de gancho.

Presión en punta con los dedos:



Fig. 43 Mano en posición presión en punta con los dedos.

Presión en punta fina:

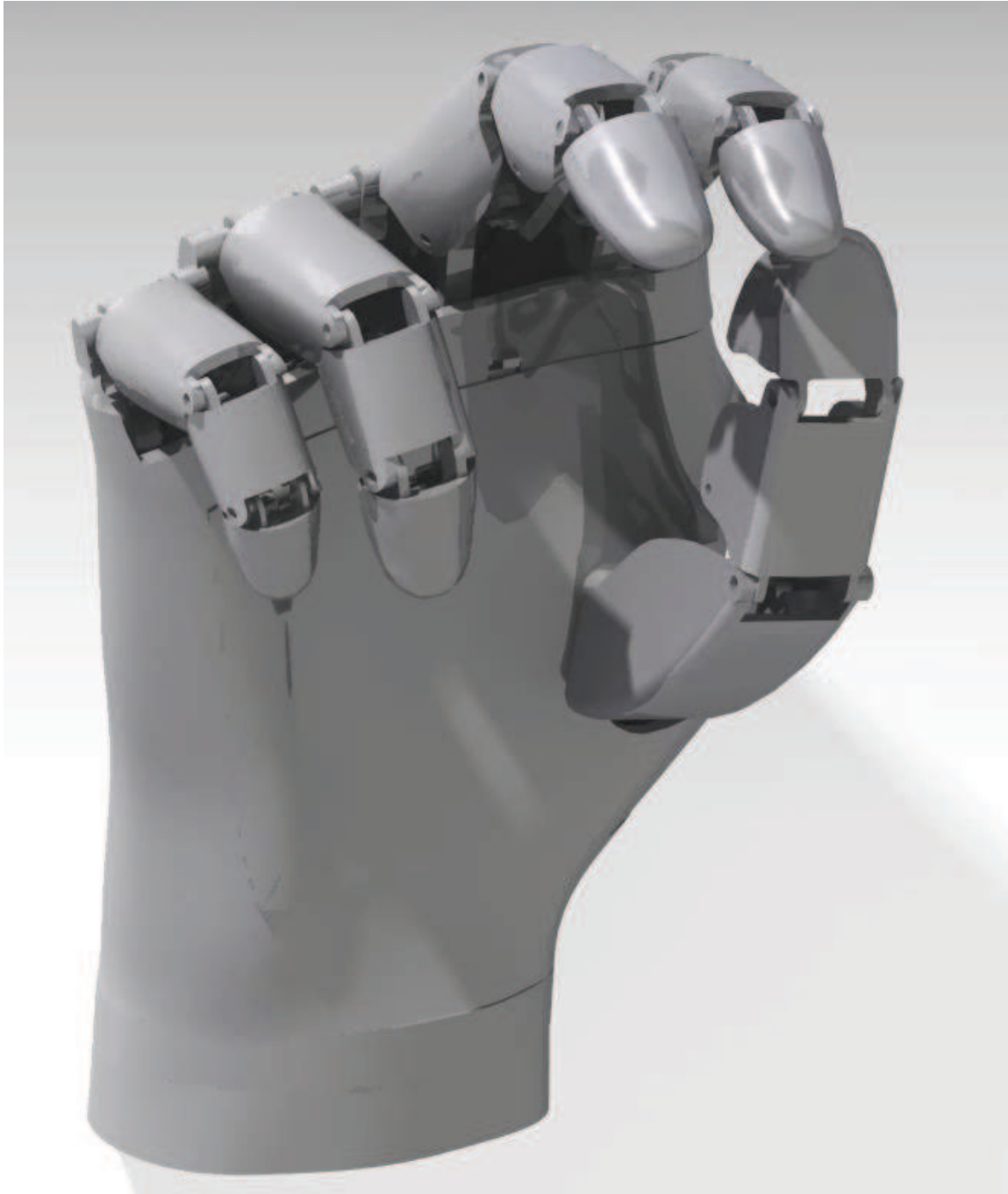


Fig. 44 Mano en posición presión en punta fina.

Capítulo 6.

Conclusiones y Trabajo a Futuro

CONCLUSIONES

Se propusieron los pasos y a su vez los sub-ensambles para llevar a cabo el ensamble total de la mano CDMIT en su diseño original así como en el rediseño de la misma.

La aplicación del método de Boothroyd a la mano CDMIT fue exitosa ya que se logró reducir el tiempo estimado de ensamble de 403.8 [s] a 234.1 [s], lo cual representa una reducción del 42% respecto del valor inicial.

En cuanto a la eficiencia del ensamble, ésta se logró aumentar del 12.63% al 21.78%. Los objetivos iniciales marcan una reducción del 50% del tiempo inicial de ensamble e incrementar la eficiencia hasta un 25%; estos números no se alcanzaron a cabalidad, sin embargo, el análisis realizado y las mejoras que se propusieron permitieron reducir el número de piezas de la mano de 74 al inicio a sólo 45, lo cual representa una reducción del 39.2% en este número y supera al objetivo inicial de 30%.

Debido a lo anterior, se consideró que el rediseño es satisfactorio ya que la reducción en el número de piezas tiene un impacto importante en los costos de producción; aunado a esto, la reducción en el estimado del tiempo de ensamble (que supera el 40%) permite vislumbrar un producto más económico.

Las principales acciones que permiten alcanzar los números finales fueron, principalmente, la eliminación de las piezas que eran excesivas en número y realmente difíciles de manejar debido a su tamaño que eran los pernos y tornillos, otra acción que permitió este resultado fue la eliminación de procesos de unión extras como la soldadura entre los ganchos y las cremalleras.

Otras acciones que mejoraron el diseño y que no necesariamente ayudaron a la reducción del tiempo de ensamble pero sí aportan mejoras a desempeño de la mano fueron la aplicación de los ángulos entre dedos que evitará que los dedos rocen entre sí, por otro lado se eliminó la movilidad de los eslabones sobre sus ejes los cuales causaban que el mecanismo no se moviera de manera adecuada.

Sin embargo, hubo mejoras que no pudieron llevarse a cabo, estas fueron el análisis de la deposición de material en la manufactura y el diseño de zonas para el acomodo de cables y demás piezas eléctricas, esto último se debió principalmente a la falta del material del diseño original, esto se propone mejorar en un futuro.

Por último, con los datos obtenidos del rediseño, tiempo de ensamble total y eficiencia de ensamble, se puede verificar que éstos se encuentran en el rango que el autor del método considera adecuados (Boothroyd, 2005).

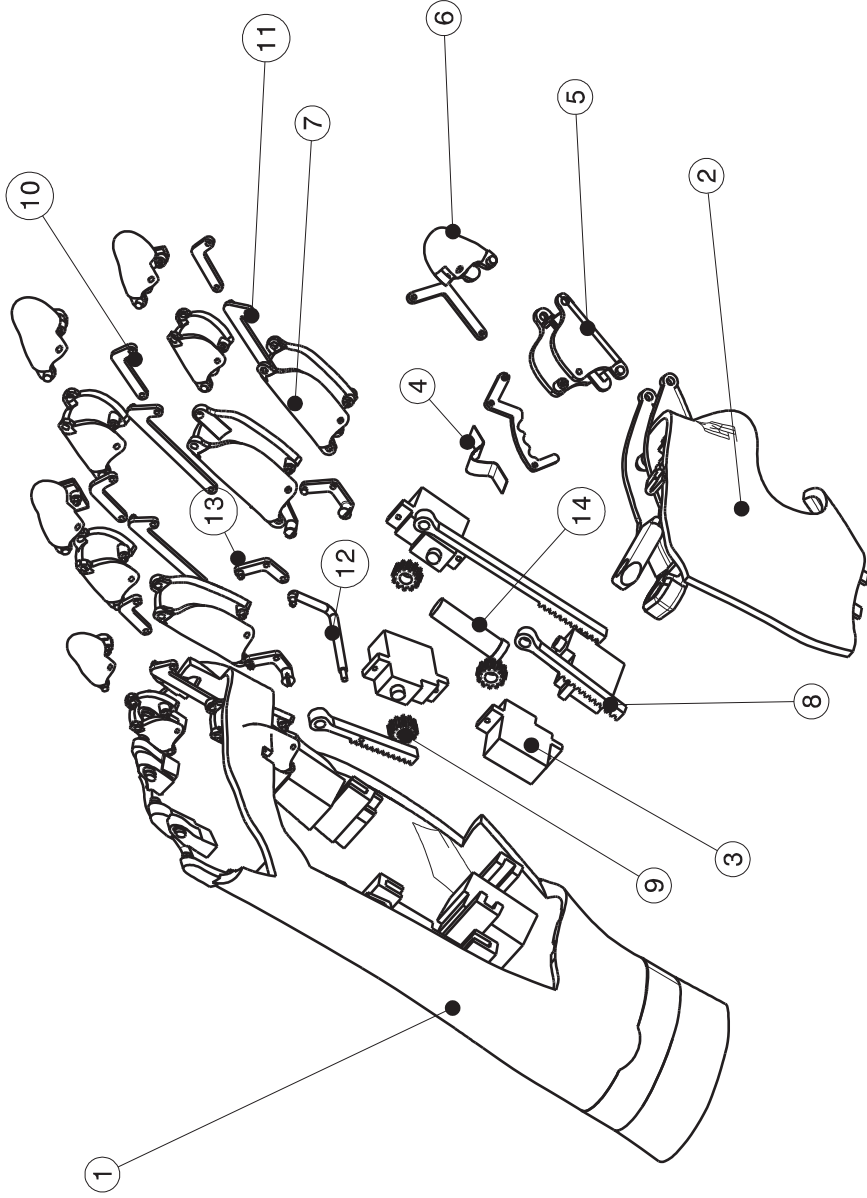
TRABAJO A FUTURO

El trabajo a futuro propuesto para este trabajo se muestra a continuación en los siguientes puntos:

- **Manufactura de mano:** Para poder conocer cómo es que se va a comportar la mano protésica físicamente, es necesario manufacturar la misma y realizar pruebas las cuales arrojen resultados más allá de los calculados.
- **Corrección de rasters:** Ya que la mano no fue manufacturada, no fue posible realizar una corrección de la posición de los rasters, es necesario realizar un análisis correcto de éstos para evitar que las piezas se rompan.
- **Conexiones:** La falta de elementos del diseño original no permitió que se aplicara esta mejora, una vez que se tengan los motores así como el sistema electrónico es necesario hacer un diseño en la carcasa para poder realizar un acomodo correcto de cables y demás piezas.
- **Manufactura individual de Snap-Fit:** Para conocer el comportamiento de las piezas Snap-fit es necesario manufacturar estas en diferentes tamaños y materiales y realizar pruebas.
- **Pruebas de la mano con el sistema electrónico:** Para conocer el comportamiento de la mano rediseñada con los motores es necesario realizar pruebas con los mismos, debido a que en el rediseño no se hicieron cambios en el mecanismo que afecten el funcionamiento no se esperan problemas con la movilidad sin embargo es importante realizar estas pruebas.
- **Implementación de muñeca articulada:** Como se mencionó en la tesis se dejó en la muñeca de la mano un espacio para insertar una muñeca que está siendo desarrollada en el Centro de Investigación Avanzada, el trabajo a futuro sería unir ambos sistemas y que estos puedan trabajar al unísono.

Partes

Número	Part Number	Cantidad
1	Dorso	1
2	Tapa	1
3	Motor	4
4	Resorte	1
5	Falange medial	5
6	Flanage distal	5
7	Falange proximal	5
8	Cremallera	3
9	Piñon	3
10	Eslabón 3	5
11	Eslabón 2	5
12	Gancho anular	1
13	Eslabón 1	4
14	Eje pulgar	1



DESIGNED BY:

Adriana Itzel Hernández Contreras

DATE:

11/08/2015

SIZE

A3

SCALE

1:2

Explosivo Mano rediseñada



Material: ABS

Referencias

- Batchelor, R. (1995). *Henry ford: Mass production, modernism and design (studies in design and material culture)*. Manchester Univ Pr.
- Beer, F., y Johnston, P. (2013). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Interamericana.
- Boothroyd, y Dewhurst. (2015). *Desing for manufacturing and assembly*. Descargado 2014-05-15, de <http://www.dfma.com/>
- Boothroyd, G. (1982). *Design for assembly: The road to higher productivity*. Assembly Engineering.
- Boothroyd, G. (2005). *Assembly automation and product design, second edition (manufacturing engineering and materials processing)* (2.^a ed.). CRC Press.
- Boothroyd, G., y Dewhurst, P. (1983). *Design for assembly : a designer's handbook*. Amherst, Ma. : University of Massachusetts, Dept. of Mechanical Engineering.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., y Knight, W. A. (2010). *Product design for manufacture and assembly, third edition (manufacturing engineering and materials processing)* (3.^a ed.). CRC Press.
- Calkini, I. T. S. D. (2015). *Assambly design*. Descargado de www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r14059.DOC
- da Silva, C. E. S., Salgado, E. G., Mello, C. H. P., da Silva Oliveira, E., y Leal, F. (2014). Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly. *International Journal of Production Research*, 52(10), 2851-2866.
- Edge, E. (2015). *Abs.* Descargado 2015-05-23, de http://www.engineersedge.com/plastic/materials_ommon_plastic.htm
- Favi, C., y Germani, M. (2012). A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: from product architecture to assembly sequence. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 6(3), 155-169.
- Flores, R. I., y Juárez, A. M. (2007). *Diseño de prótesis mecatrónica de mano* (Tesis de Licenciatura). UNAM, México.
- García-Guerra, H. L., y Dorador-González, J. M. (2013, 9). State of the art and analysis of design for assembly of large and heavy parts. *Key Engineering Materials*, 572, 253-256.

- GrabCAD. (2015). *Male hand*. Descargado 2015-02-10, de <https://grabcad.com>
- Henchy, L. (1988). American manufacturing fights back. *Business Solutions*, 10.
- Hernández, A. I. (2013). *Diseño para ensamble de prótesis cdmit2* (Tesis de Licenciatura). UNAM, México.
- Inc, S. W. (2015). *Snap-fit*. Descargado 2015-04-10, de <http://steinwall.1e8.getliveedit.com/pages/DesignforSnaps>
- Jum'Azulhisham, A. S., S., K. A., A., H., y Rosdzimin. (2010, Sep). Development of design for manufacturing assembly (dfma) software in bahasa melayu. En *International conference on design and concurrent engineering*.
- Leaney, P., y Wittenberg, G. (1992). Design for assembling. *Assembly Automation*, 12(2), 8-17.
- of Technolog, M. I. (2015). *Snap-fit*. Descargado 2015-03-11, de
- Prakash, W. N., Sridhar, V. G., y Annamalai, K. (2014). New pproduct development by dfma and rapid prototyping. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(3).
- Prospector. (2015). *Abs material*. Descargado 2015-05-21, de <http://plastics.ulprospector.com/generics/1/c/t/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-properties-processing>
- Snapfit4. (2015). *Snap-fit calculator*. Descargado 2015-03-11, de <http://snapfit4.cmg.net/SnapFit/workspace.jspl>
- Stone, R. B., McAdams, D. A., y Kayyalethekkel, V. J. (2004). A product architecture-based conceptual {DFA} technique. *Design Studies*, 25(3), 301 - 325.
- Todić, V., Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., y Vukman, J. (2012). Manufacturability of product design regarding suitability for manufacturing and assembly (dfma). *Journal of production engineering*, 16(1).
- University, N. C. S. (2015). *Historical developments, future trends and career opportunities in manufacturing*. Descargado 2014-01-10, de http://www.ncsu.edu/project/nc-teched/8115/unit_b/003_01.html
- Velázquez, M. (2011). *Construcción y pruebas del prototipo cdmit-ii* (Tesis de Licenciatura). UNAM, México.
- Wood, A., Wood, C., y Mattson, C. (2014, Oct). Application and modification of design for manufacture and assembly principles for the developing world. En *Global humanitarian technology conference (ghct), 2014 ieee* (p. 451-457).