

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PROTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR

IVAN MANUEL ROMERO RINCON

IVAN GABRIEL PEREZ BERTEL



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA
2006-2007**

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PROTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR

IVAN MANUEL ROMERO RINCON

IVAN GABRIEL PEREZ BERTEL

**Trabajo de grado para optar al titulo de
Ingeniero Mecánico.**

**Director
ALFONSO SANTOS JAIMES
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA
2006-2007**

NOTA DE ACEPTACION

El documento presentado a continuación fue calificado y aprobado por los jurados nombrados por el comité académico, bajo las normas vigentes de la universidad.

Firma del Presidente de Jurados

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Bucaramanga, 2007

DEDICATORIA

Gracias a mis padres y hermanos por todo el apoyo, por su comprensión credibilidad y confianza brindados en todo momento sin restricción alguna. Junto con mi familia a mi compañero y gran amigo Iván Pérez por la confianza que me brindó en todo el tiempo que compartimos, por su constancia, firmeza y ánimo que fueron bases importantes para concluir de manera satisfactoria y victoriosa la vida universitaria.

Iván Manuel

DEDICATORIA

Agradezco y dedico todo el trabajo a Dios inicialmente, por ser esa base fuerte que me ha instruido y me ha permitido siempre afrontar las dificultades. A mis padres por los oportunos consejos, incesante apoyo y por el amor que siempre han depositado en mí y en mi familia. A mi hermana y mi hermano por su apoyo y comprensión permanentes. A mi compañero y amigo Iván Manuel por su energía, por su dedicación y por la compañía en la elaboración de este proyecto.

Iván Gabriel

AGRADECIMIENTOS

Para una satisfactoria culminación del proyecto fue necesaria la colaboración de personas talentosas e íntegras.

Agradecemos enormemente la orientación y el apoyo de Ingeniero Alfonso Santos quien con sus conocimientos, experiencia y disposición nos permitió superar los obstáculos encontrados en la realización del proyecto.

Al Ingeniero Fabio Guzmán por el tiempo que nos dedicó y las sugerencias que nos hizo para una mejor elaboración del proyecto.

Al señor Milton Sánchez por su disposición para colaborarnos incondicionalmente en la elaboración de las partes.

A la empresa metalmecánica JAIRO ZAMBRANO, con ella a la señora Claudia y a los trabajadores Nelson y John por su oportuna colaboración para la construcción de las piezas.

A la empresa MAQUINADOS Y MONTAJES por la colaboración para el corte de la pinza.

A los profesores y compañeros de Ingeniería Mecánica.

CONTENIDO

INTRODUCCION	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
2. MARCO TEORICO	19
2.1 TIPOS DE PROTESIS	19
2.1.1 Prótesis Mecánicas.	19
2.1.2 Prótesis Eléctricas.....	19
2.1.3. Prótesis neumáticas..	20
2.2 GRADOS DE LIBERTAD GDL	21
2.2.1 Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas	21
2.2.2. Grados de libertad en mecanismos en un plano.....	23
2.3 ENGRANES	24
2.3.1. Engranés de eje paralelo	24
2.3.2. Engranés no paralelos coplanares	25
2.3.3. Engranés no paralelos no coplanares	25
2.4. SERVOMOTORES.....	26
2.5. ELEMENTOS DE UNION	27
2.5.1. Sujetador roscado	27
2.5.2. Sujetador remachado.....	27
2.5.3. Juntas soldadas	27
2.5.4. Uniones adhesivas	27

2.6 ACOPLAMIENTOS MECANICOS	28
2.6.1. Acoplamiento Rígido.....	28
2.6.2. Acoplamientos flexibles.....	29
2.6.3. Acoplamientos especiales o articulados.....	29
2.7. COJINETES	30
3. DISEÑO CONCEPTUAL	31
3.1. DISEÑOS INICIALES	31
3.1.1. Apertura y cierre de la mano.....	31
3.1.2. Pronación y supinación de la muñeca	34
3.1.3. Elevación del brazo	36
3.2. DISEÑOS FINALES.....	38
3.2.1. Apertura y cierre de la mano.....	39
3.2.2. Pronación y supinación de la muñeca.....	44
3.2.3. Elevación del brazo	45
4. DISEÑO DETALLADO	47
4.1. CÁLCULOS DE FUERZAS EN LA PINZA.....	47
4.1.2. Cálculo de la longitud del eslabón de unión y su ángulo con el eje horizontal	48
4.1.3. Cálculo de torque necesario en la pinza	49
4.1.4. Cálculo del servomotor necesario	54
4.1.5. Asignación del material de los elementos de la pinza.....	57
4.2. CÁLCULO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL ACOPLE DEL ROTOR Y SELECCIÓN DEL MATERIAL	59
4.3. CÁLCULOS DE FUERZAS EN EL SOPORTE DE LOS MOTORES	61
4.3.1. Análisis estático	61

4.3.2. Cálculo de esfuerzo en el soporte de los motores	63
4.4. CÁLCULOS DE ESFUERZO EN EL EJE PRINCIPAL	65
4.4.1. Cálculo del motor necesario	66
4.4.2. Cálculo de esfuerzos en el eje principal	68
5. ANALISIS VIRTUAL DE ESFUERZOS	71
5.1. Análisis virtual del soporte de los motores	71
5.1.1. Factores de seguridad en el soporte de los motores	74
5.2. Análisis virtual del eje principal de la prótesis	75
5.3. Análisis virtual de los piñones	76
6. PROCESOS DE MANUFACTURA Y OBTENCION DE MATERIALES Y PARTES	80
6.1. CONSTRUCCION DE LA PINZA, PRIMERA SECCION	80
6.2. CONSTRUCCIÓN DE LA SEGUNDA SECCION	86
6.3. CONSTRUCCIÓN DE LA TERCERA SECCION	87
6.4. ENSAMBLE DE TODO EL SISTEMA MECANICO	89
7. PRUEBAS DEL SISTEMA	91
7.1. PRUEBA DE APERTURA Y CIERRE DE LA PINZA	91
7.1.1. Comportamiento en la apertura	91
7.1.2. Comportamiento en el cierre	91
7.1.3. Prueba de prensado de objetos	92
7.2. PRUEBA DE GIRO DE LA MUÑECA (PRONACIÓN - SUPINACION) ..	94
7.3. PRUEBA DE MOVIMIENTO DE ELEVACION DEL CODO	95
8. ANALISIS DE COSTOS	97
CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFIA	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de prótesis mecánica.....	19
Figura 2. Imagen de una prótesis mioeléctrica.	20
Figura 3 Un cuerpo rígido en un plano tiene tres GDL	21
Figura 4 Eslabones de diferente orden.....	22
Figura 5. Engranajes cónicos helicoidales no paralelos coplanares.	25
Figura 6 Tornillo Sin fin.	26
Figura 7. Cojinete de deslizamiento.....	30
Figura 8. Dedo pulgar	31
Figura 9. Dedo índice.	32
Figura 10. Eslabón de unión.....	32
Figura 11. Apoyo	32
Figura 12. Polea	33
Figura 13. Pinza 1	33
Figura 14. Barra giratoria, buje-pasador.....	34
Figura 15. Barra giratoria en buje del pasador.....	35
Figura 16. Soporte de motores	35
Figura 17. Barra giratoria y soporte de motores en pasador	35
Figura 18. Engranajes rectos en la segunda sección y mecanismo para pronosupinación de la muñeca.	36
Figura 19. Orquilla.....	37
Figura 20. Pasador acoplado en orquilla y bujes de fricción.....	37
Figura 21. Transmisión de la tercera sección.....	38
Figura 22. . Dedo pulgar. a) Diseño inicial, b) diseño final, c) sólido final.	39
Figura 23. Dedo índice. a) Diseño inicial, b) diseño final, c) sólido final.	40
Figura 24. Eslabón de unión final.	40
Figura 25. a) Apoyo inicial, b) apoyo frontal superior final, c) sólido final.....	41
Figura 26. Transmisión de la pinza.	42
Figura 27. Bujes de apoyo del sinfín.....	42
Figura 28. Cubo de acople.	43
Figura 29. a) Diseño inicial, b) diseño final.	43
Figura 30. Tornillo rotor de la pinza.....	44
Figura 31. Rotor.....	44
Figura 32. Conjunto de acople del rotor.	45
Figura 33. Acople pasador y orquilla, reformas del diseño.	45
Figura 34. Eje de transmisión del mecanismo de codo.	46
Figura 35. Disposición del mecanismo en posición cerrada.	47
Figura 36. Diagrama para análisis de longitudes del mecanismo.....	48
Figura 37. Disposición del eslabón de unión.	49
Figura 38. Ángulos de rotación del dedo índice, pulgar y eslabón de unión.....	50
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre del objeto a sostener.	51
Figura 40. . Fuerzas en el mecanismo de la pinza.	53
Figura 41. Servomotor FUTABA S3107 Micro.	56
Figura 42. Pinza terminada.....	58
Figura 43. Esfuerzo de flexión en acople del rotor.	59

Figura 44. Factor de concentración de esfuerzos para barras redondas con filetes	60
Figura 45. Diagrama de cuerpo libre de la prótesis.....	61
Figura 46. Diagramas de cortante y momento flector del soporte de los motores.	62
Figura 47. Zona crítica 1º del soporte de los motores.....	63
Figura 48. Zona crítica 2º, ranura del soporte de los motores.....	64
Figura 49. Diagrama de cuerpo libre de la prótesis.....	65
Figura 50. Fuerza en el piñón de ascenso.....	66
Figura 51. Servomotor Futaba S9206.....	68
Figura 52. Diagrama de fuerzas, de cortante y de momentos en eje principal..	69
Figura 53. Enmallado del soporte de los motores.	71
Figura 54. a) Fuerzas externas del soporte de los motores, b) ubicación de la pieza en el sistema.	72
Figura 55. Distribución de esfuerzos en el soporte de los motores según Von-Mises.	73
Figura 56. Distribución de esfuerzos en el soporte de los motores según teoría del esfuerzo cortante máximo.	74
Figura 57. Ambiente de cargas para el eje principal.	75
Figura 58. Esfuerzo máximo según criterio de Von-mises.....	76
Figura 59 Factor de seguridad según Von-mises.....	76
Figura 60. Ambiente de cargas de los piñones	77
Figura 61. Esfuerzo máximo. a) Piñón grande, b) Piñón pequeño.....	78
Figura 62. Factor de seguridad. a) Piñón grande, b) Piñón pequeño.	79
Figura 63. Tabla de calibres de metales para corte láser.	81
Figura 64. Corte de la máquina láser.....	82
Figura 65. (a) Rebaba del corte con láser por la parte posterior de la lámina. ..	83
Figura 66. Perfiles terminados	83
Figura. 67 Piezas de la pinza construidas y servomotor.	85
Figura 68. Ensamble de primera sección.....	85
Figura 69. Piezas de la segunda sección construidas y servomotor de elevación del brazo.	87
Figura 70. Orquilla y gancho acoplados.....	88
Figura 71. Maquinado del pasador.....	89
Figura 72. . Piezas de la tercera sección terminadas.	89
Figura 73. Totalidad de piezas de la prótesis.....	90
Figura 74. Prótesis completamente armada.....	90
Figura 75. Apertura de la pinza.....	92
Figura 76. Prensado de objeto de 330gr.....	93
Figura 77. Prensado de un objeto de 500 gr.	94
Figura 78. Movimiento del codo.....	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de fricción.....	52
Tabla 2. Especificaciones técnicas del servomotor de la pinza.	56
Tabla 3 Especificaciones técnicas del servomotor del codo.....	67
Tabla 4. Piezas de la primera sección.....	84
Tabla 5. Piezas de la segunda sección.	86
Tabla 6. Piezas de la tercera sección.....	87
Tabla 7 Costos de manufactura y de partes de la prótesis.....	97

ANEXOS

Anexo A. Plano de despiece del sistema mecánico

Anexo B. Plano de ensamble del sistema mecánico

RESUMEN

**DISEÑO Y CONTRUCCION DE UNA PROTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR
IVAN MANUEL ROMERO RINCON, IVAN GABRIEL PEREZ BERTEL.
INGENIERIA MECANICA**

ALFONSO SANTOS JAIMES

**PALABRAS CLAVES: PROTESIS, MIEMBRO SUPERIOR, PRONACION,
SUPINACION, MATERIALES, MECANISMOS, GRADOS LIBERTAD,
DISEÑO.**

El proyecto realizado muestra la forma como un problema social es analizado por la ingeniería, y, ofrece soluciones que permiten minimizar los efectos en una persona. En el análisis de la discapacidad ocasionada por la ausencia del miembro superior se pueden obtener algunos resultados implementando las prótesis. Para obtener una prótesis funcional fue necesario el estudio de los mecanismos que permitieran una adecuada transmisión de la potencia de un servomotor, y, de igual forma, produjeran los movimientos de pronación, supinación y elevación del brazo, los cuales representan tres grados de libertad en el sistema. El análisis de los diseños de cada una de las piezas, los materiales, y los procesos de manufactura permitieron una adecuada resistencia, apariencia y peso. Se logra entonces, un estudio importante acerca del sistema mecánico de la prótesis de miembro superior, en el que se enuncian las ventajas e inconvenientes encontrados en los diferentes materiales y diseños, y, al emplear diferentes mecanismos en los tres movimientos; resultados que se basan en las pruebas realizadas. También se obtienen conclusiones acerca del uso de software CAD y CAE para diseño y simulación de las partes mecánicas. Al final se observa el resultado de la ingeniería aplicada a la biomédica con un resultado favorable. Es un gran aporte que permitirá a los interesados continuar con la investigación acerca de las prótesis de miembro superior partiendo desde bases sustentadas.

SUMMARY

DESIGN AND BUILDING OF AN UPPER LIMB PROSTHESIS

IVAN MANUEL ROMERO RINCON, IVAN GABRIEL PEREZ BERTEL.

INGENIERIA MECANICA

ALFONSO SANTOS JAIMES

KEYWORD: PROSTHESIS, UPPER LIMB, PRONATION, SUPINATION, MATERIALS, MECHANISMS, FREEDOM DEGREES, DESIGN.

The Project realized shows how a social problem is analyzed by engineering, offering solutions that reduce the effects of a person's condition. Results can be obtained by using prosthesis in disability caused by the upper limb absence. In order to obtain a functional prosthesis it was necessary to study the mechanism that allowed an adequate power transmission by a servo motor as well as the movements of pronation, supination and arm lifting, these movements represent the three freedom degrees in the system. Each parts design analysis, the materials and the manufacture processes allowed a proper resistance, appearance and weight. The result is an important study about the upper limb prosthesis mechanic system, in which advantages and disadvantages found in different materials, designs and mechanisms used in the three movements have been enunciated; these results have been based on the performed tests. Conclusions about the software CAD and CAE used for design and simulation of mechanical parts are also obtained. At the end, it is possible to observe the results of applied engineering biomedicine. It is a great contribution that will allow interested people continue with the investigation about the upper limb prosthesis from sustained foundations.

INTRODUCCION

En el desempeño de algunas actividades cotidianas claramente se observan riesgos para la salud humana. Aspectos como la violencia han generado igualmente un fuerte impacto en la vida del hombre. Para disminuir dicho impacto, el papel de la ingeniería ha sido fundamental, ha permitido en muchas ocasiones el mejoramiento de las condiciones de vida de una persona o población. Con la ingeniería se ha disminuido la intervención del hombre en muchos procesos industriales de riesgo mediante la inserción de procesos automatizados, se han mejorado las condiciones de seguridad y los procedimientos para la realización de algunas actividades, de igual modo, se han hecho aportes importantes a la medicina con la elaboración de prótesis e investigaciones en esta área,.

Se han elaborado gran cantidad de sistemas protésicos para remediar la pérdida de una extremidad, dentro de estos sistemas podemos diferenciar cuatro grandes grupos que son: las prótesis cosméticas, las prótesis mecánicas, las prótesis eléctricas y las prótesis mioeléctricas, siendo las últimas las de mayor demanda en la actualidad e igualmente las de mayor costo.

El principal propósito de este proyecto es contribuir con la investigación en el área de biomédica, centrándonos en el diseño mecánico de las prótesis mioeléctricas para miembros superiores.

Para la realización del proyecto se ha considerado la dinámica del miembro superior, limitando el desarrollo de la prótesis a tres grados de libertad (**GDL**). Estos movimientos se consiguen a través del mecanismo de elevación y descenso del brazo, mecanismo de apertura y cierre de la pinza, y, mecanismo para prono-supinación de la muñeca. En la realización de una prótesis funcional, es necesario tener en cuenta el peso, por esta razón el análisis de materiales y esfuerzos es uno de los puntos básicos de la investigación, así mismo, el tamaño de las piezas y su forma ha sido fundamental para cumplir con los objetivos propuestos.

El total de las piezas ha sido de diseño propio. Cada pieza se diseñó para cumplir con condiciones de tamaño, forma, espacio, peso, resistencia, costo y facilidad de maquinado y ensamble, todo esto con miras a obtener una prótesis de bajo costo asequible a cualquier persona.

Se utilizaron sistemas de transmisión de potencia básicos, como son la transmisión sinfín-corona y por engranajes rectos accionados por

servomotores. En ellos se diseñaron topes mecánicos que limitan el movimiento de las piezas a unos ángulos determinados. El sistema mecánico se diseñó para facilitar el acople del sistema electrónico, formando en conjunto una prótesis mioeléctrica con la cual se hicieron las respectivas pruebas.

En los siguientes capítulos se mostrará la metodología utilizada, se explicará cada una de las etapas en que consiste la elaboración del proyecto e igualmente los resultados obtenidos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una prótesis de miembro superior funcional aplicable a personas con amputaciones de codo.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar y editar información referente a las prótesis de miembro superior existentes.
- Seleccionar y especificar materiales y mecanismos a utilizar en la construcción de la prótesis.
- Construir las piezas en base al diseño detallado.
- Realizar la simulación de las partes críticas en cuanto a esfuerzo de la prótesis utilizando Solid Edge y Ansys para la comprobación de los cálculos teóricos.
- Realizar pruebas del sistema mecánico acoplado con el sistema electrónico.

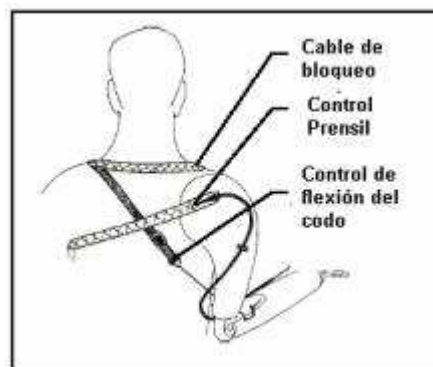
2. MARCO TEORICO

Una prótesis es un dispositivo diseñado para reemplazar una parte faltante del cuerpo o para mejorar el funcionamiento de una parte del mismo. Las prótesis suelen usarse para reemplazar ojos, brazos, manos y piernas faltantes o enfermas [1].

2.1 TIPOS DE PROTESIS

2.1.1 Prótesis Mecánicas. (Véase figura 1). Las manos mecánicas son dispositivos que se utilizan con la función de apertura o cierre voluntario por medio de un arnés, el cual se sujeta alrededor de los hombros, parte del pecho y del brazo y es controlado por el usuario. Su funcionamiento se basa en la extensión de una liga por medio del arnés para su apertura o cierre, y el cierre o apertura se efectúa solo con la relajación del músculo respectivamente gracias a un resorte y tener una fuerza de presión ó pellizco. Estos elementos se recubren con un guante para dar una apariencia más estética, sin embargo se limita al agarre de objetos relativamente grandes y redondos ya que el guante dificulta la sujeción de objetos pequeños.

Figura 1 Mecanismo de prótesis mecánica



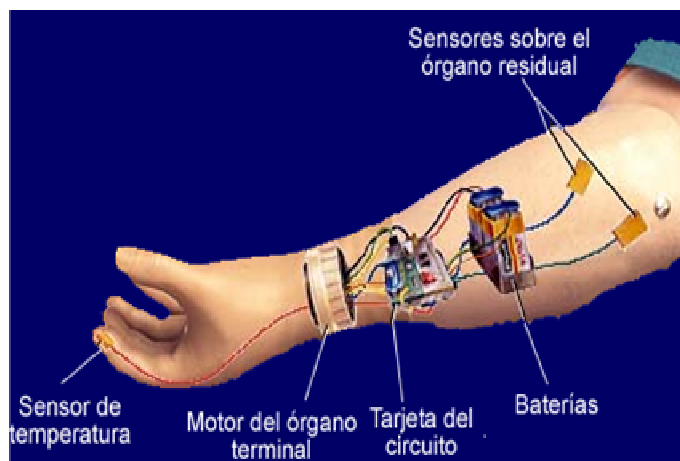
Tomada de: J.M. Dorador González, et al. Simposio: la investigación en la facultad de ingeniería (UNAM), Diseño de Prótesis Inteligentes, Prótesis mioeléctrica [en línea]: [citado en 2007-02-01]: http://www.fi-p.unam.mx/simposio_investigacion2dic04/disenio_protesis_extenso.html

2.1.2 Prótesis Eléctricas. Estas prótesis usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, muñeca o codo con una batería recargable. Éstas prótesis se controlan de varias formas, ya sea con un servo control, control con botón pulsador o botón con interruptor de arnés. En ciertas ocasiones se combinan éstas formas para su mejor funcionalidad.

2.1.3. Prótesis neumáticas. Estas prótesis eran accionadas por ácido carbónico comprimido, que proporcionaba una gran cantidad de energía, aunque también presentaba como inconveniente la complicación de sus aparatos accesorios y del riesgo del uso del ácido carbónico.

2.1.4. Prótesis Mioeléctricas. (Véase figura 2). Las prótesis mioeléctricas son prótesis eléctricas controladas por medio de un poder externo mioeléctrico, estas prótesis son hoy en día el tipo de miembro artificial con más alto grado de rehabilitación (véase figura 2). Sintetizan el mejor aspecto estético, tienen gran fuerza y velocidad de prensión, así como muchas posibilidades de combinación y ampliación [2].

Figura 2. Imagen de una prótesis mioeléctrica.



Tomada de: J.M. Dorador González, et al. Simposio: la investigación en la facultad de ingeniería (UNAM), Diseño de Prótesis Inteligentes, Prótesis mioeléctrica [en línea]: [citado en 2007-02-01]: http://www.fi-p.unam.mx/simposio_investigacion2dic04/disenio_protesis_extenso.html

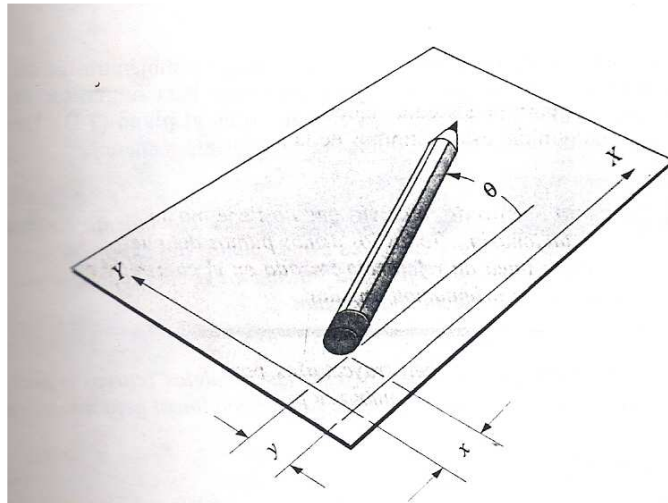
- **Pronación:** movimiento del antebrazo que hace girar la palma de la mano hacia abajo hasta mostrar el dorso [16].
- **Supinación:** acción o movimiento por el cual el cuerpo humano o alguna de sus partes es colocada en posición de supino (decúbito supino o dorsal). Así, la "supinación de la palma de la mano", implica el movimiento del antebrazo y mano para que la palma quede mirando "hacia arriba" [17].

2.2 GRADOS DE LIBERTAD GDL

El **GDL** de un sistema es igual al número de parámetros independientes (medidas) que se necesitan para definir unívocamente su posición en el espacio en cualquier instante

En la figura 3 se observa un lápiz colocado sobre una hoja en un plano que tiene un sistema de coordenadas xy . Si este lápiz permanece en el plano del papel se requieren tres parámetros (*GDL*) para definir completamente la posición del lápiz en el papel, dos coordenadas lineales (x , y) para definir la posición de cualquier punto del lápiz y una coordenada angular (θ) para definir el ángulo que forma ese objeto con respecto al eje x . el mínimo número de medidas necesarias para definir su posición se muestra en la figura como x , y , θ . Este sistema del lápiz en el plano tiene entonces tres *GDL*. Observe que los parámetros particulares elegidos para definir su posición no son únicos. Podría utilizarse un conjunto alternativo de tres parámetros. Hay una infinidad de conjuntos de parámetros posibles, pero en este caso deben ser tres por conjunto, por ejemplo dos longitudes y un ángulo, para definir la posición del sistema, ya que un cuerpo rígido en movimiento plano tiene tres *GDL* [3].

Figura 3 Un cuerpo rígido en un plano tiene tres GDL



Tomada de: NORTON, ROBERT L. Diseño de maquinaria. Capítulo 2, página 25. México, Mc. Graw Gill, 2000

2.2.1 Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas

La exploración de la cinemática de mecanismos se iniciará con una investigación del tema de diseño de eslabonamientos. Estos sistemas son los

componentes básicos de todos los mecanismos. Se observará que las formas comunes de mecanismos son de hecho variantes de una clase común de eslabonamientos, los cuales se componen de eslabones y juntas.

Eslabón, es un cuerpo rígido que posee por lo menos dos nodos, que son los puntos de unión con otros eslabones. (Véase Figura 4).

Eslabón binario, que tiene dos nodos.

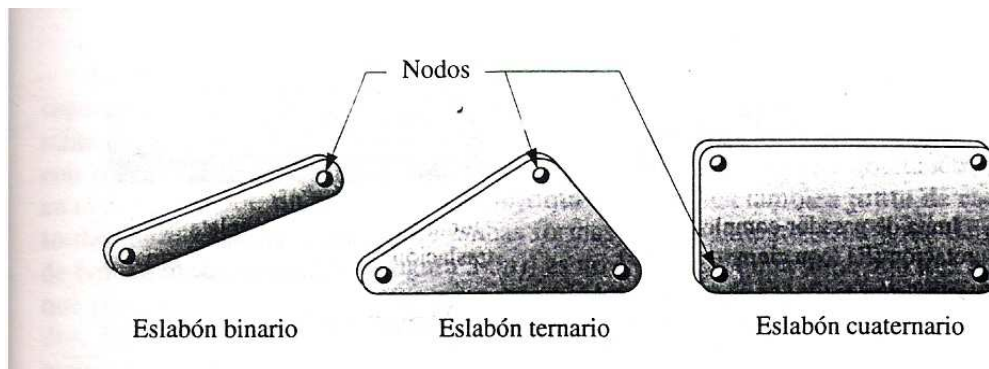
Eslabón ternario, que tiene tres nodos.

Eslabón cuaternario, que tiene cuatro nodos.

Una **junta** es una conexión entre dos o más eslabones (en sus nodos), la cual permite algún movimiento o movimiento potencial, entre los eslabones conectados. Las juntas (llamadas también pares cinemáticas) se pueden clasificar de varios modos:

1. Por el tipo de contacto entre los elementos: de línea, de punto o de superficie.
2. Por el número de grados de libertad permitidos en la junta.
3. Por el tipo de cierre de la junta, de fuerza o de forma.
4. Por el número de eslabones conectados (orden de la junta).

Figura 4 Eslabones de diferente orden.



Tomada de: NORTON, ROBERT L. Diseño de maquinaria, Capítulo 2, página 27, México, Mc. Graw Gill, 2000

Una forma más útil de clasificar las juntas (pares), es por el número de grados de libertad que hay entre dos elementos unidos.

Una junta de pasador rotacional (R) y una junta de traslación de corredera (P) son uniones llamadas juntas completas (es decir, completa = 1 GDL), y son pares inferiores.

Par inferior, se usa para describir juntas con contacto de superficie (como el de un pasador dentro de su agujero).

Par superior, se usa para describir las juntas con contacto de punto o de línea.

2.2.2. Grados de libertad en mecanismos en un plano

Para determinar los *GDL* totales de un mecanismo se debe tener en cuenta el número de eslabones y juntas, así como las interacciones entre ellos. Los *GDL* de un ensamblaje de eslabones pueden predecirse a partir de una investigación de la condición de **Gruebler**.

Ecuación de Gruebler.

$$M = 3L - 2J - 3G \quad (2.1a)$$

Donde: M = grados de libertad o movilidad
 L =número de eslabones
 J =número de juntas
 G =número de eslabones fijos

Observe que en un mecanismo real, aún cuando más de un eslabón de la cadena cinemática esté fijo el efecto neto será crear un eslabón fijo mayor y de orden superior, ya que solo hay un plano de sujeción, por tanto, G es siempre igual a 1 y la ecuación de Gruebler se convierte en:

$$M = 3(L - 1) - 2J \quad (2.1b)$$

El valor de J en las ecuaciones 2.1a y 2.1b debe reflejar el valor de todas las juntas en el mismo mecanismo. Es decir, las semijuntas cuentan como $\frac{1}{2}$ debido a que solo eliminan un *GDL*. Esto es menos confuso si se utiliza la modificación de **Kutzbach** para la ecuación de Gruebler en esta forma:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (2.1c)$$

Donde: M = grados de libertad o movilidad
 L =número de eslabones
 J_1 =números de 1 *GDL*, juntas completas
 J_2 =números de 2 *GDL*, semijuntas m

El valor de J_1 y J_2 en estas ecuaciones aún debe determinarse cuidadosamente para considerar todas las juntas completas, las semijuntas y las juntas múltiples en cualquier eslabonamiento. Las juntas múltiples cuentan en una unidad menos que el número de eslabones conectados en tal junta y se agrega a la categoría de "completa" (J_1). Los *GDL* de un mecanismo propuesto pueden determinarse rápidamente a partir de esta expresión antes de invertir tiempo en

un diseño mas detallado. Es interesante observar que esta ecuación no aporta información acerca de tamaño y formas de eslabones, sino solo su cantidad [3].

2.3 ENGRANES

Un engrane se puede considerar como una rueda dentada que cuando se acopla con otra rueda dentada de diámetro mas pequeño (el piñón), transmitirá rotación de un eje a otro. La función principal de un engrane es transmitir potencia entre dos ejes, manteniendo una razón definida entre las velocidades rotacionales de las flechas.

Los dientes de n engrane impulsor empujan los dientes de un engrane impulsado, ejerciendo una componente de la fuerza perpendicular al radio del engrane. De esta forma se transmite un par de torsión y como el engrane gira, se transmite potencia. Su eficiencia de transmisión de potencia puede ser tan alta como el 98%. Usualmente los engranajes son más costosos que otros transmisores de par de torsión, tales como los de transmisión por cadena y por banda [4].

2.3.1. Engranajes de eje paralelo

Un **eje** es un miembro rotatorio o estacionario, el cual usualmente tiene una sección transversal circular mucho mas pequeña en el diámetro que su longitud misma y tiene montados elementos transmisores de potencia, tales como engranes, poleas, bandas, cadenas, levas, volantes, manivelas, ruedas dentadas y cojinetes de elementos rodantes. Las cargas sobre el eje pueden ser de varias combinaciones de flexión (casi siempre fluctuante); de torsión (fluctuante o no); de cortante de choque, axial, normal o transversal [5].

Los engranes de eje paralelo son el tipo de engrane más simple y popular. Estos engranes conectan ejes paralelos y pueden transferir grandes cantidades de potencia con alta eficiencia. En esta clasificación los engranes **rectos** y los **helicoidales** son dos de los principales tipos de engranes [4].

Engranajes rectos, son aquellos en donde la sección de corte se mantiene constante a lo largo de su sentido axial, constituyen el tipo de engranes más sencillo de fabricar. Se utilizan en situaciones en donde es necesario la transmisión de potencia en ejes paralelos [6].

Engranés Helicoidales, son aquellos en donde se ha creado un ángulo entre el recorrido de los dientes con respecto al eje axial con el fin de asegurar una entrada mas progresiva del contacto entre diente y diente reduciendo el ruido de funcionamiento y aumentando la resistencia de los dientes. Se usa en aplicaciones donde es necesaria la transmisión entre ejes paralelos a altas velocidades, por ejemplo, en cajas reductoras de automóviles [7].

2.3.2. Engranés no paralelos coplanares

Estos son los engranes de ejes no paralelos (contrarios a los engranes rectos y helicoidales, los cuales tiene ejes paralelos) y que son coplanares (como los engranes rectos y helicoidales). Los engranes cónicos rectos, zerol (Véase figura 5) y espirales se encuentran en la clase coplanar no paralela [4].

Figura 5. Engranajes cónicos helicoidales no paralelos coplanares.



Tomada de: TODOENGRANAJES, Engranajes [en línea]: [citado en 2007-02-02]: <http://todoengranajes.com/>

2.3.3. Engranés no paralelos no coplanares

Los engranes no paralelos no coplanares son más complejos en geometría y manufactura que los engranes de las clasificaciones previas. Como resultado, estos engranes son mas caros que los otros analizados. Estos sistemas proporcionan relaciones de reducción considerablemente mas altas que los conjuntos de engranes coplanares o de ejes cruzados simples; pero su capacidad de soporte de carga es baja, su presión de contacto es bastante alta y su tasa de desgaste es elevada. Así, las transmisiones por **tornillo sin fin** solo sirven para aplicaciones de carga ligera [4] (Véase figura 6).

Figura 6 Tornillo Sin fin.



Tomada de: TODOENGRANAJES, Tornillo sin fin [en línea]: [citado en 2007-02-02]: <http://www.todoengranajes.com/sinfin.html>.

2.4. SERVOMOTORES

Un servomotor (también llamado **Servo**) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está limitado a estos. Es posible modificar un servomotor para obtener un motor de corriente continua que, si bien ya no tiene la capacidad de control del servo, conserva la fuerza, velocidad y baja inercia que caracteriza a estos dispositivos [8].

Estructura interna

- **Motor de corriente continua:** Es el elemento que le brinda movilidad al servo. Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje aplicado a sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.
- **Engranajes reductores:** Se encargan de convertir gran parte de la velocidad de giro del motor de corriente continua en torque.
- **Circuito de control:** Este circuito es el encargado del control de la posición del motor. Recibe los pulsos de entrada y ubica al motor en su nueva posición dependiendo de los pulsos recibidos.

2.5. ELEMENTOS DE UNION

Un sujetador es un dispositivo que sirve para conectar o unir dos o mas miembros. Existen muchos tipos de sujetadores y variaciones para uso de los ingenieros.

2.5.1. Sujetador roscado

La mayoría de los sujetadores roscados consisten de un perno que pasa por un agujero de los miembros que se van a unir y acoplado con una tuerca. En ocasiones el perno se acopla con roscas en lugar de una tuerca, este tipo se denomina tuerca de cabeza. Un birlo tiene rosca en ambos extremos y se atornilla, mas o menos permanentemente, en el agujero roscado de uno de los miembros que se van a unir.

2.5.2. Sujetador remachado

Los remaches se usan ampliamente como sujetadores de miembros en edificios, puentes, calderas, tanques, barcos y (en general) para cualquier estructura. En el diseño se utiliza el diámetro del remache en lugar del diámetro del agujero, aunque el diámetro del remacha se puede expandir en el ensamble y casi llenar el agujero.

2.5.3. Juntas soldadas

Una soldadura se logra uniendo dos miembros y luego agitando las moléculas en sus uniones (usualmente por calor), hasta que se funden en conjunto. Cuando se remueve la fuente de agitación, los miembros quedan unidos permanentemente.

2.5.4. Uniones adhesivas

La unión adhesiva es el proceso de unir materiales químicamente a través de la formación de uniones interatómicas o intermoleculares. La unión adhesiva sirve para unir una gran variedad de materiales (metal con metal, metal con cerámica, metal con polímero, etc.) tanto para uso estructural como no estructural [9].

2.6 ACOPLAMIENTOS MECANICOS

Los acoplamientos tienen como función prolongar líneas de transmisión de ejes o conectar tramos de diferentes ejes, estén o no alineados entre si.

Para llevar a cabo tales funciones se dispones de diferentes tipos de acoplamientos mecánicos. Tales como:

- acoplamientos rígidos
- acoplamientos flexibles
- acoplamientos especiales o articulados

Cada uno de los diferentes tipos de acoplamientos existentes, posee características importantes que los hace más aptos para una tarea que para otra. Por otro lado, los acoplamientos son dispositivos cuya elección para un servicio determinado, es fuertemente dependiente del ofrecimiento en plaza de las empresas que las fabrican. En estas circunstancias no es posible delinear una teoría general o modelo matemático general de comportamiento de selección de acoplamientos y es recomendable utilizar la información que ofrecen los fabricantes en sus prospectos comerciales. Mas allá de esta practica razonable, la selección de un tipo específico de acoplamiento estará supeditada al servicio que deba realizar.

2.6.1. Acoplamiento Rígido

Los acoplamientos rígidos se fijan a los ejes de manera que no existe el desplazamiento relativo entre ambos, sin embargo se puede permitir cierto desajuste o juego axial. Estos acoplamientos se utilizan cuando la precisión del par de torsión es de suma importancia. La maquinaria para producción automática suele tener en sus componentes, acoplamientos rígidos. Los servomecanismos que no deben presentar juego angular, también emplean acoplamientos rígidos.

Acoplamientos rígidos de manguito con prisionero, estos acoplamientos cierran o ajustan por interferencia, mediante los tornillos que este posee. Algunos suelen poseer una chaveta o un prisionero común a ambos ejes, sin embargo es usual que estos casos se empleen en trasmisiones de baja potencia o bajo torque. Los que tienen un ajuste preponderante por interferencia suelen tener los prisioneros con los extremos en forma de tasas para que se incrusten en el eje, a su vez los ejes en los extremos deben tener algún ligero rebaje para efectuar el ajuste en forma gradual.

En caso de no contar con datos de fabricante, para contar con detalles de cálculo de interferencia se sugiere emplear coeficientes de rozamiento entre 0,15 y 0,20, correspondientes a la fricción de hierro fundido [10].

2.6.2. Acoplamientos flexibles

Para transmitir el par de un eje a otro, un acoplamiento elástico:

- absorbe y amortigua las irregularidades del par
- desplaza los regímenes críticos
- acepta desalineaciones y diferencias entre los ejes
- permite algunas deformaciones de chasis
- suprime las posibles tensiones de un acoplamiento rígido en las mismas condiciones
- permite una construcción más ligera, con tolerancias mayores y por tanto, con mayor economía

En particular, si las máquinas acopladas están instaladas sobre soportes elásticos, el acoplamiento elástico es absolutamente necesario.

El acoplamiento elástico no tiene juego, y por tanto, es silencioso, sin fricción y no necesita engrase [11].

2.6.3. Acoplamientos especiales o articulados

Las juntas universales permiten un desalineamiento angular considerable de los ejes ya que tienen ejes que se intersecan. Estas juntas son usadas generalmente en los extremos del eje de transmisión de los automóviles de tracción trasera.

El acople de Hooke (como también es conocido) consiste en un miembro rígido que se articula a los ejes de entrada y salida, y cuyos brazos son perpendiculares entre sí. Esta disposición permite acoplar ejes que se cortan en el centro de la cruceta.

2.7. COJINETES

Pieza o elemento mecánico que sirve de apoyo a un eje, le facilita su giro y reduce fricción y esfuerzos. Según el tipo de contacto entre las piezas, pueden ser de deslizamiento o de rodadura y, según el elemento de rodadura que llevan en su interior, los hay de bolas, de rodillos o de agujas. También hay cojinetes radiales o axiales en función del tipo o sentido del esfuerzo sobre el mismo [12].

Cojinete de deslizamiento: (Véase figura 7). Cojinete que permite la rotación del árbol, por fricción directa entre ambos o por la interposición entre los mismos de una sustancia generalmente líquida llamada lubricante; verificándose un movimiento de deslizamiento entre el árbol y el cojinete, directo si no existe lubricante o indirecto si el mismo existe (el árbol se desliza sobre la 'maza' del lubricante y esta sobre el cojinete) [13].

Figura 7. Cojinete de deslizamiento.



Cojinete de fricción de bronce.

Tomada de: COJINETE DE FRICCION DE BRONCE [en línea]: [citado en 2007-02-02]:
http://www.educa.aragob.es/iesillue/tecno/web_curso/transmision_movimiento/6/tm6im1.htm

3. DISEÑO CONCEPTUAL

Para el diseño de la prótesis se definieron tres secciones las cuales corresponden a los grados de libertad del sistema.

Aquí se observará la evolución del diseño de cada una de las secciones, teniendo en cuenta la funcionalidad y la facilidad de construcción.

3.1. DISEÑOS INICIALES

Al analizar la dinámica del miembro superior se pudieron identificar tres movimientos importantes:

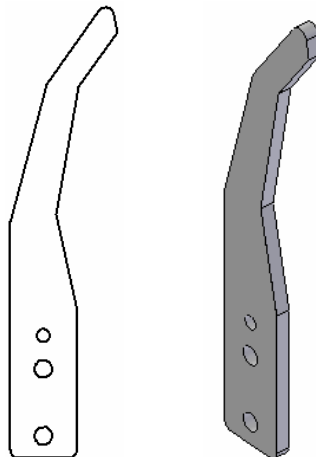
- Apertura y cierre de la mano
- Pronación y supinación de la muñeca
- Elevación del brazo

3.1.1. Apertura y cierre de la mano

Para imitar el movimiento de apertura y cierre de la mano se diseñó una pinza tridigital, la cual definiría la **primera sección de la prótesis**.

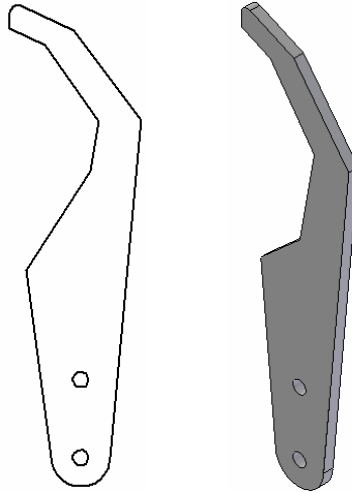
- **Dedo pulgar:** (Véase figura 8). pieza elaborada imitando la forma del dedo pulgar.

Figura 8. Dedo pulgar



- **Dedo índice:** (Véase figura 9). Diseño hecho imitando la forma del dedo índice con bordes interiores elaborados para facilitar la sujeción de piezas.

Figura 9. Dedo índice.



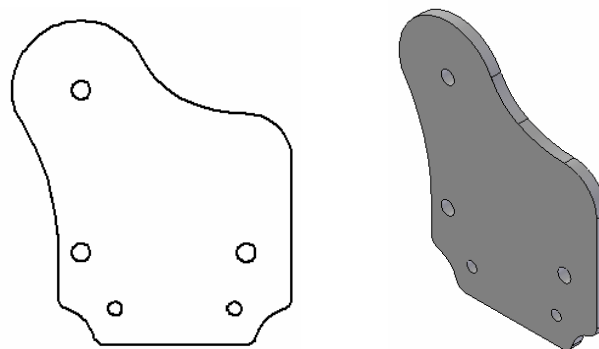
- **Eslabón de unión:** (Véase figura 10). Pieza para unir los dedos índice y pulgar, y transmitir el movimiento de un dedo al otro.

Figura 10. Eslabón de unión



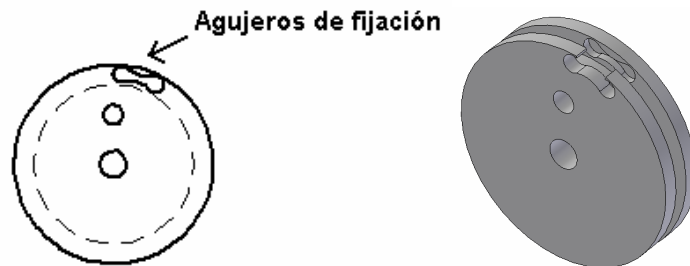
- **Apoyo:** (Véase figura 11). Pieza elaborada para simular la estructura de la mano y dar soporte a los dedos índice y pulgar que conforman el mecanismo. Contiene los centros pivotes de los dedos.

Figura 11. Apoyo



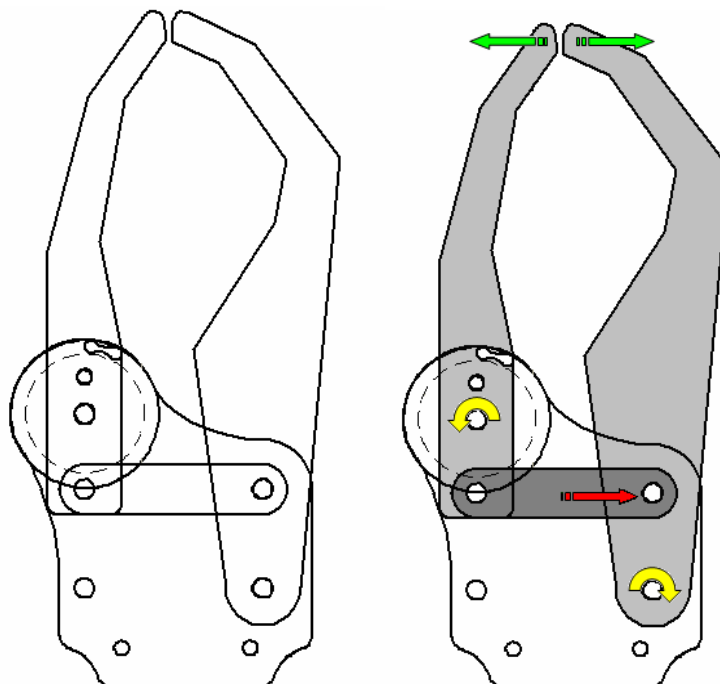
- **Polea:** (Véase figura 12). Pieza utilizada como elemento de transmisión de potencia. Elaborada con agujeros para ajustar las bandas e impedir su deslizamiento. Está fija al dedo pulgar mediante un tornillo.

Figura 12. Polea



Primera sección terminada: (Véase figura 13). Se observa el montaje de todos los elementos de la primera sección de la prótesis, formando la Pinza, la cual imitaría la apertura y el cierre de la mano. Los servomotores accionan el mecanismo y transmiten su potencia a través de la polea ubicada en el apoyo, la cual comparte el eje del dedo pulgar. El dedo que recibe la potencia de la polea y por ende del motor es el pulgar. Al producirse su apertura, el movimiento se transmite por medio del eslabón de unión hacia el dedo índice ocasionando el desplazamiento de este dedo.

Figura 13. Pinza 1



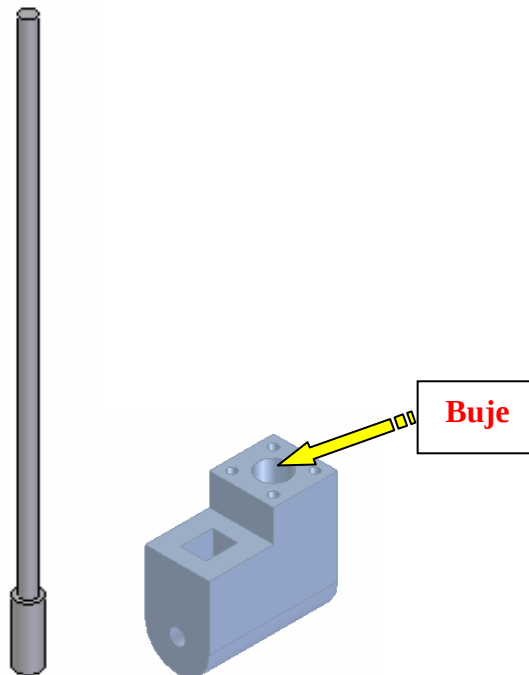
El punto de partida para determinar las posiciones de los centros de giro de los dedos en el apoyo, fue el peso del objeto que levantará la prótesis.

3.1.2. Pronación y supinación de la muñeca

Para imitar el movimiento de pronación y supinación de la muñeca inicialmente se diseñó una barra giratoria que de igual forma sería el soporte para la primera sección, la pinza, dando origen a la **segunda sección de la prótesis**.

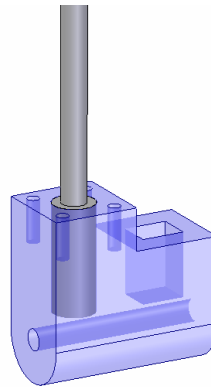
- **Barra giratoria:** (Véase figura 14). Pieza diseñada para permitir el movimiento de la **pinza** gracias a una transmisión de piñones rectos. Un engrane se encuentra ubicado en la barra giratoria, compartiendo su mismo eje, y el otro está ubicado en el motor. El motor a su vez se sostiene gracias al soporte del motor (Véase figura 16).

Figura 14. Barra giratoria, buje-pasador



La barra gira dentro de un buje ubicado dentro del **pasador**, pieza que hace parte del mecanismo del codo (Véase figura 15).

Figura 15. Barra giratoria en buje del pasador.



- **Soporte de motores:** Pieza diseñada para dar soporte a los motores del codo y de la segunda sección. También se encuentra acoplada al pasador el cual es su soporte.

Figura 16. Soporte de motores

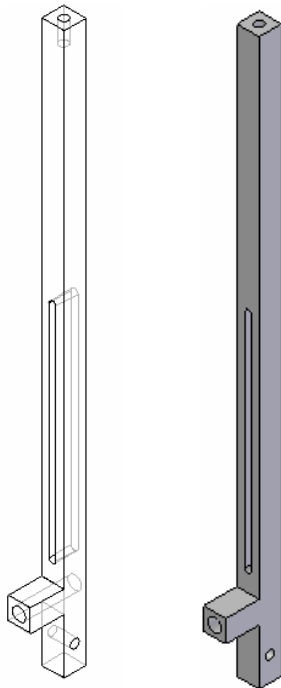
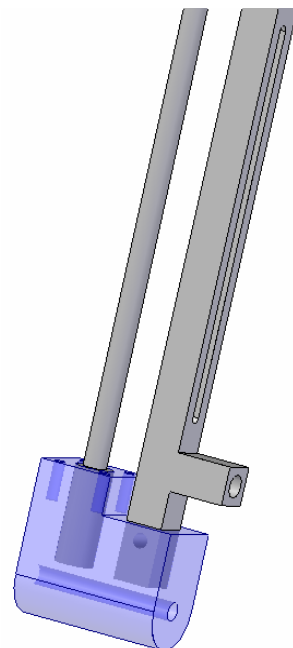
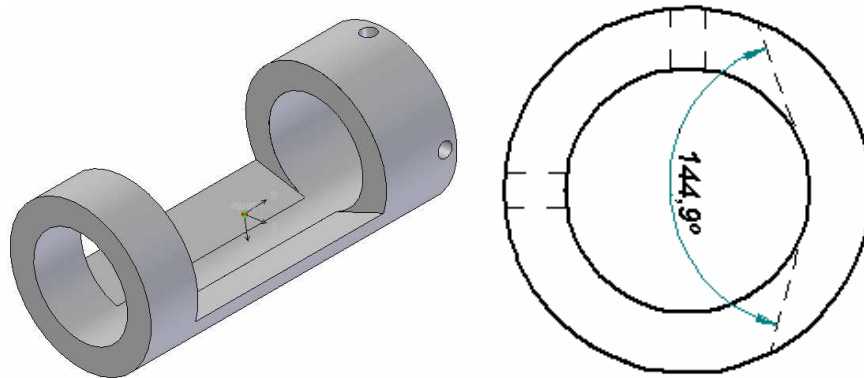


Figura 17. Barra giratoria y soporte de motores en pasador



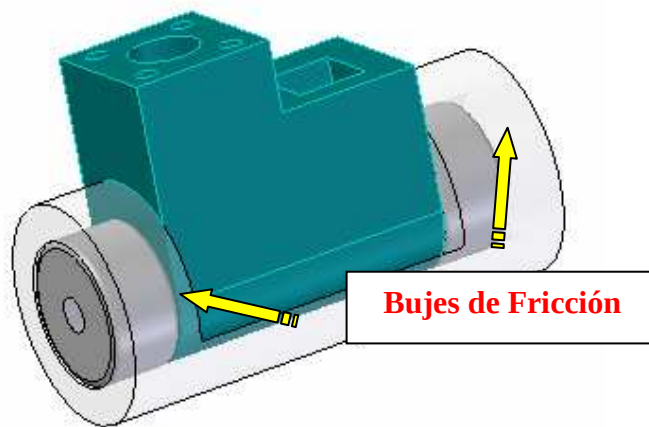
- **Soporte de barra:** Pieza diseñada para impedir que la barra giratoria y el soporte de los motores se desacoplen del pasador (Véase figura 18).

Figura 19. Orquilla.



- **Bujes de fricción:** (Véase figura 20) Elementos necesarios para anclar el pasador a la orquilla permitiendo su giro libre e impidiendo que se desacople. El pasador y los bujes a su vez están unidos por un tornillo que enrosca en uno de los bujes.

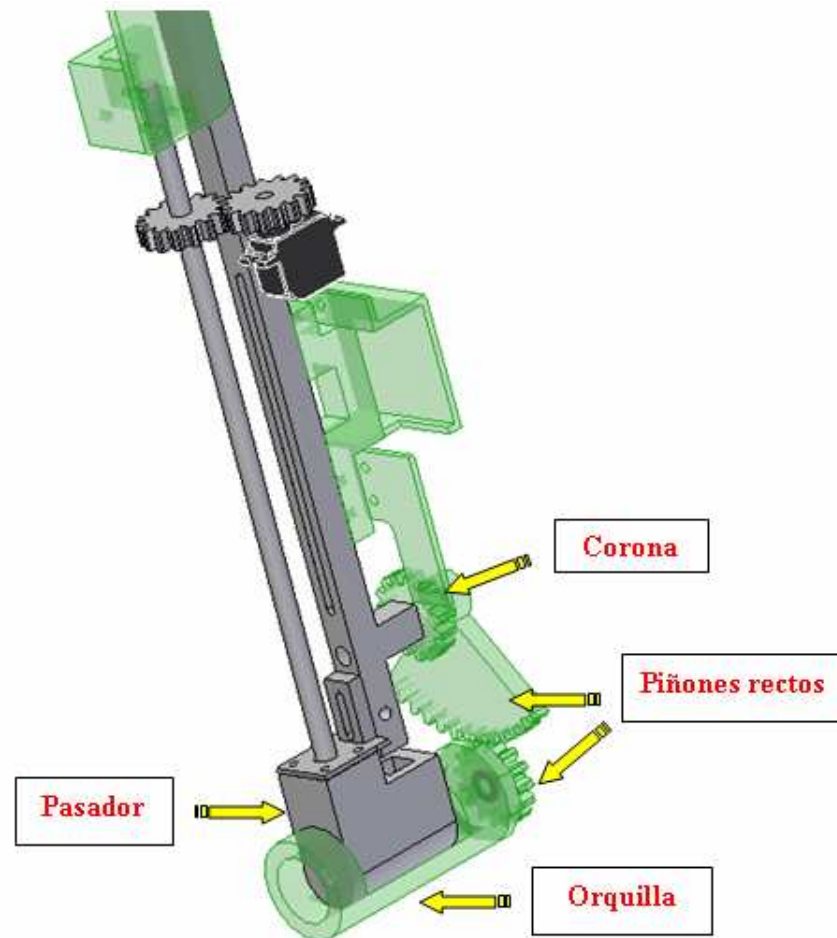
Figura 20. Pasador acoplado en orquilla y bujes de fricción.



La anterior figura muestra el acople del pasador a la orquilla. En el diseño inicial el pasador incluye el orificio para permitir la inserción de la barra giratoria y su movimiento.

- **Transmisión sinfín-corona y engranes rectos:** (Véase figura 21). Medio de transmisión utilizado para producir la elevación del brazo (primera y segunda sección).

Figura 21. Transmisión de la tercera sección.



Se optó por una transmisión de tornillo sinfín-corona para permitir que el mecanismo fuera autobloqueante, así mismo, para aumentar el torque del servomotor y reducir la velocidad de giro del eje de la corona. Seguido se encuentra un par de piñones rectos los cuales producirán el ascenso del brazo.

3.2. DISEÑOS FINALES

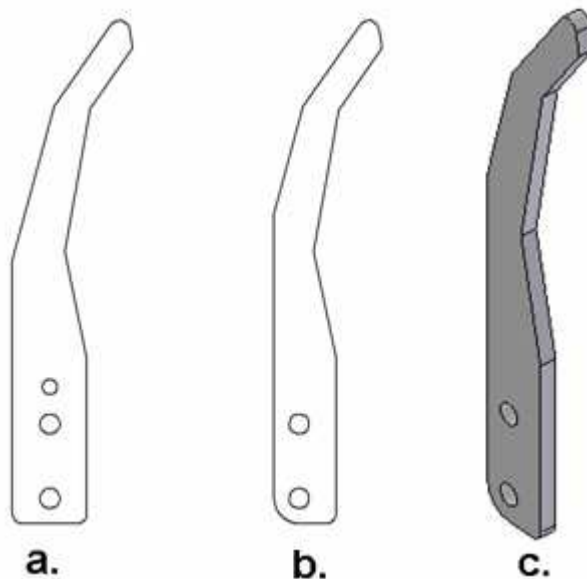
Al analizar la funcionalidad, eficiencia y construcción de los diseños anteriores se concluye que es aceptable producir cambios en algunas de las piezas de cada sección. Estos cambios traerían consigo algunas ventajas en cuanto a la estética, el tamaño, la eficiencia del sistema y la facilidad de construcción. A continuación se muestran los diseños finales de la prótesis.

3.2.1. Apertura y cierre de la mano

Conservando la característica de tres dedos del diseño anterior pero cambiando la forma de cada uno, modificando el diseño del apoyo de los dedos y el diseño de la transmisión de potencia, se obtuvo lo siguiente:

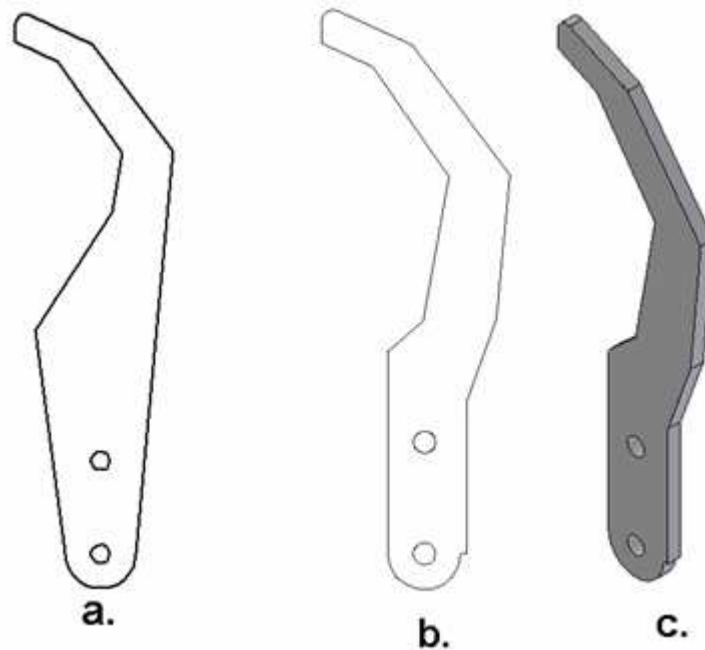
- **Dedo pulgar:** (véase figura 22). Las modificaciones para el dedo pulgar se basan en la forma, tamaño y la distribución de los centros de giro. Su forma inicial fue modificada en gran parte para corresponder a la estética de toda la pinza. Se eliminó el agujero de fijación de la polea; Los centros de giro se analizaron para que en la posición de apertura de la pinza y en la posición de cierre se conservara la forma de la mano humana. Así mismo teniendo en cuenta, que en su movimiento, el dedo pulgar no se saliera del margen marcado por el apoyo.

Figura 22. . Dedo pulgar. a) Diseño inicial, b) diseño final, c) sólido final.



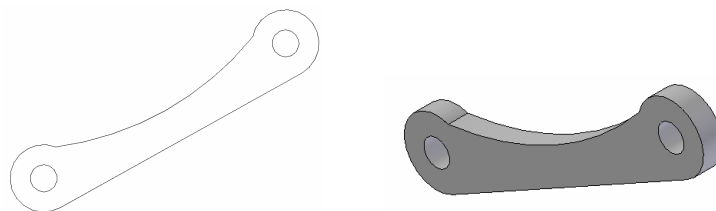
- **Dedo índice:** (véase figura 23). Para realizar las modificaciones en el dedo índice se tuvo en cuenta, así como en el pulgar, su forma y tamaño. Igualmente su nueva forma corresponde a las condiciones de estética deseadas. Se redujo considerablemente su volumen, consiguiendo con esto un menor peso de la pieza y un tamaño y forma similares a las de un dedo humano. Los bordes internos fueron elaborados para permitir la sujeción de piezas cilíndricas ya que junto con los bordes del dedo pulgar forman una cavidad adecuada. Su perfil obedece a los contornos elaborados en los nuevos apoyos. En la parte inferior del dedo índice se hizo una reducción de su ancho para evitar que el material interfiera con los dientes de la corona y del tornillo sinfín (nueva transmisión escogida para la pinza) en el momento de su acople.

Figura 23. Dedo índice. a) Diseño inicial, b) diseño final, c) sólido final.



- **Eslabón de unión:** (Véase figura 24). El eslabón se modificó teniendo en cuenta características de tamaño, espacio y estética acorde con los nuevos diseños de apoyos y dedos.

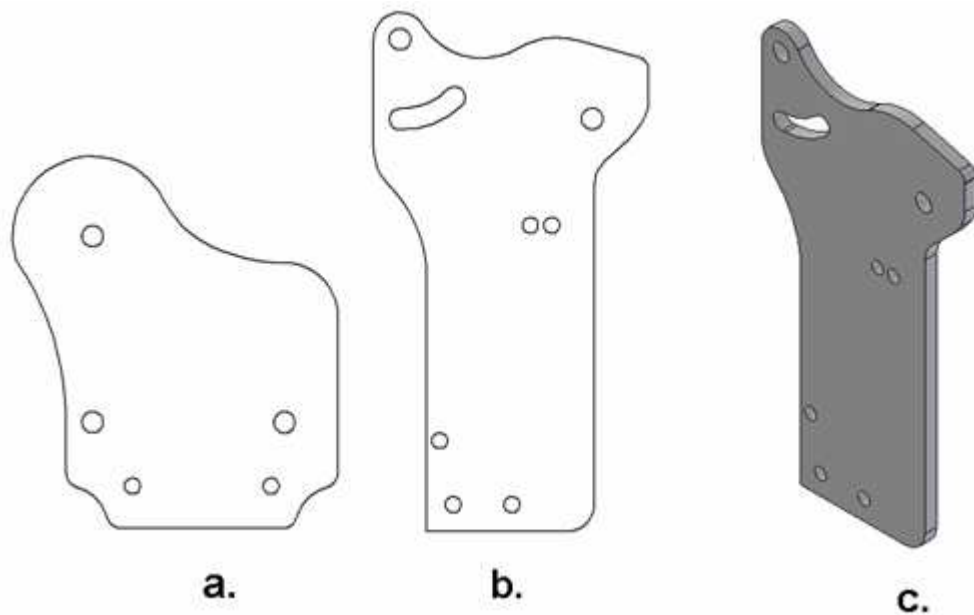
Figura 24. Eslabón de unión final.



- **Apoyos:** (Véase figura 25). La pieza se modificó completamente aumentando su altura para permitir la sujeción de la nueva transmisión de la pinza. Fue elaborada para darle una apariencia similar a la de una mano humana. Se diseñó en ella un tope mecánico que limita el ángulo de apertura de la pinza, lo que también corresponde a un accesorio de seguridad que impide que el **mecanismo de inversión de 4 barras** llegue a una posición de autobloqueo. Se diseñó pensando en que sirviera de soporte del motor que accionará la transmisión y por ende el mecanismo. En él se encuentran los agujeros que albergarán los ejes de giro de los dedos, los agujeros para el montaje de la nueva transmisión y los agujeros para el acople con la segunda sección de la prótesis. De igual forma, marca

los márgenes que sirven de referencia para el diseño de la forma y tamaño de los dedos pulgar e índice. Para conformar completamente la pinza, se usarán dos apoyos de iguales dimensiones diferenciándose por algunos agujeros interiores.

Figura 25. a) Apoyo inicial, b) apoyo frontal superior final, c) sólido final.

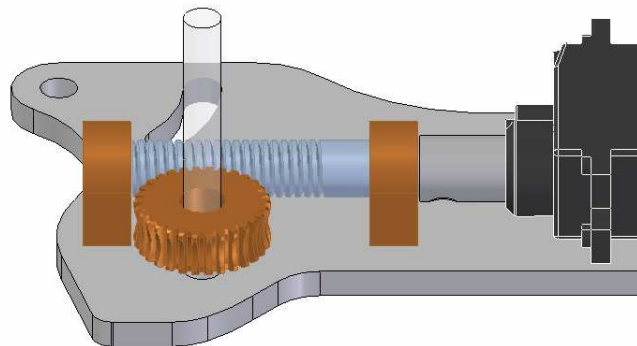


- **Transmisión por sinfín-corona:** (Véase figura 26). Transmisión utilizada para accionar el mecanismo de la pinza. Se considera este tipo de transmisión debido a su condición autobloqueante, lo que impide que el mecanismo sea abierto por fuerzas externas diferentes a las transmitidas por el motor. Así mismo, impide que las fuerzas de reacción generadas por el objeto que se sujeta puedan abrir la pinza. Otro aspecto importante al tener una transmisión por sinfín-corona es que prolonga la vida de las baterías que alimentan al servomotor, ya que conservan un estado de sujeción sin necesidad de mantener el servomotor encendido. Este tipo de transmisión permite aumentar el torque proveniente de un motor de forma considerable dependiendo de las características del tornillo sinfín y de la corona; obviamente esto trae consigo una disminución de la velocidad del eje de salida (eje de la corona) directamente proporcional al aumento del torque que se le ha transmitido al tornillo sinfín. Para esta aplicación este tipo de transmisión ocupa poco espacio, característica importante para permitir que el motor igualmente quede acoplado en los apoyos de la pinza, la cual posee un tamaño pequeño.

La transmisión por polea se eliminó debido a los inconvenientes de montaje de las partes. Aunque da la ventaja de ubicar las poleas a diferentes

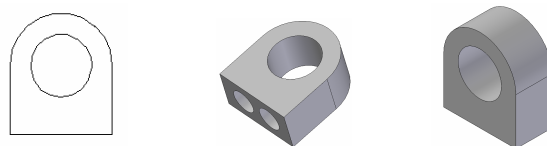
distancias, este medio de transmisión no permite una multiplicación del torque del servomotor conveniente para esta aplicación. Para conseguir una multiplicación considerable y útil del torque se tendría que variar la relación de los diámetros de las poleas en gran medida, lo que llevaría a aumentos de diámetro grandes en una de las poleas, ocupando mayor espacio en la pinza y afectando la estética de la misma. Teniendo en cuenta que se le incorporaría un *tercer grado de libertad* a la prótesis (pronación y supinación de la muñeca), el sistema de transmisión por poleas solo sería útil si se ubica dentro de la pinza; esto permitiría un movimiento independiente de la pinza (apertura y cierre) y de la muñeca (pronación y supinación), pero, eliminaría la ventaja de poder desplazar los centros de las poleas a distancias grandes. En una transmisión por poleas hay que tener en cuenta la tensión de las bandas para evitar su deslizamiento y con ello una pérdida de la potencia suministrada por el servomotor. Para corregir este problema, se diseñó unas poleas con agujeros que permitieran sujetar las bandas y evitar el deslizamiento, pero esto complica el proceso de maquinado de las poleas aumentando su costo.

Figura 26. Transmisión de la pinza.



- **Bujes de apoyo del sinfín:** (Véase figura 27). Elemento necesario para dar soporte y rigidez al tornillo sinfín, evitando que la corona y el tornillo se desalineen.

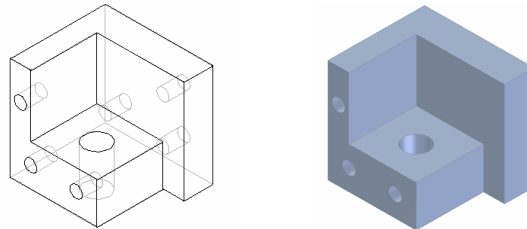
Figura 27. Buje de apoyo del sinfín.



- **Cubo de acople:** (Véase figura 28). Pieza elaborada para el diseño final. Permite la sujeción de los apoyos permitiendo que se pueda realizar el

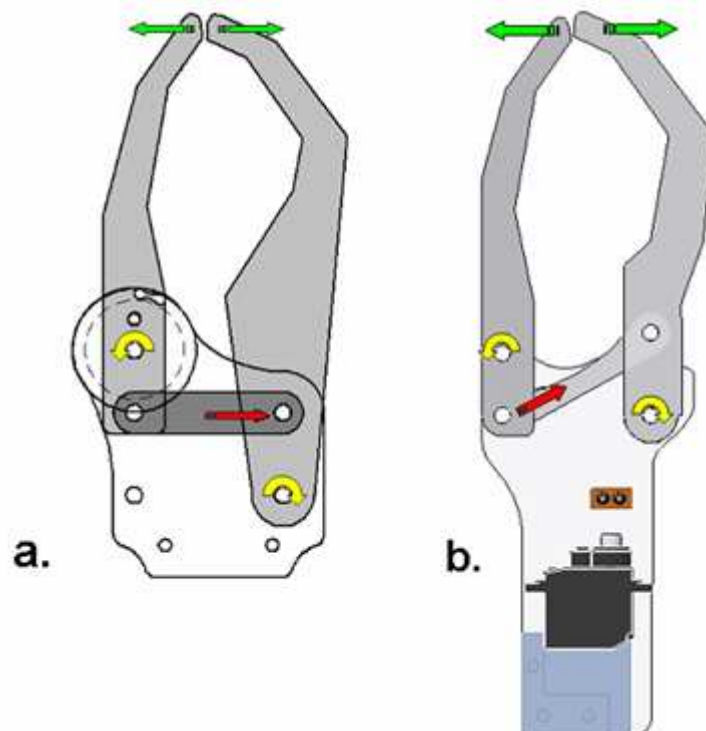
montaje de la pinza independientemente de las otras dos secciones de la prótesis.

Figura 28. Cubo de acople.



Diseño final de la primera sección: Se observa el montaje de los elementos que conforman la pinza (primera sección de la prótesis). La disposición del eslabón de unión es diferente a la del diseño inicial. Ahora el dedo que transmite el movimiento hacia los otros eslabones es el dedo índice, en donde estaría ubicada la corona, pieza que hace parte de la nueva transmisión. La corona comparte el eje de rotación del dedo índice y se fija a este mediante un tornillo. En la parte inferior del apoyo se observa la ubicación del cubo de acople (Véase figura 29).

Figura 29. a) Diseño inicial, b) diseño final.

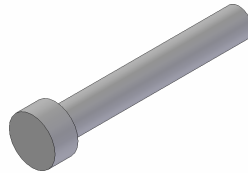


3.2.2. Pronación y supinación de la muñeca

Se hizo una gran reforma al mecanismo para prono-supinación de la muñeca. Se eliminó la barra giratoria inicialmente diseñada y se utilizó la pieza llamada *soporte de los motores* para dar sujeción a la pinza; además se diseñó un rotor que permite el acople de la pinza al soporte de los motores y a su vez, que esta gire libremente. Para producir el giro de la muñeca se utilizarán dos piñones rectos que serán accionados por un servomotor.

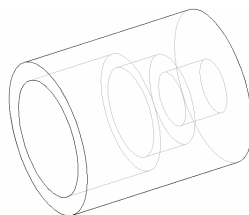
- **Tornillo rotor de la pinza:** (Véase figura 30). Pieza elaborada para cumplir la función de eje de rotación de la pinza, gira dentro del rotor.

Figura 30. Tornillo rotor de la pinza



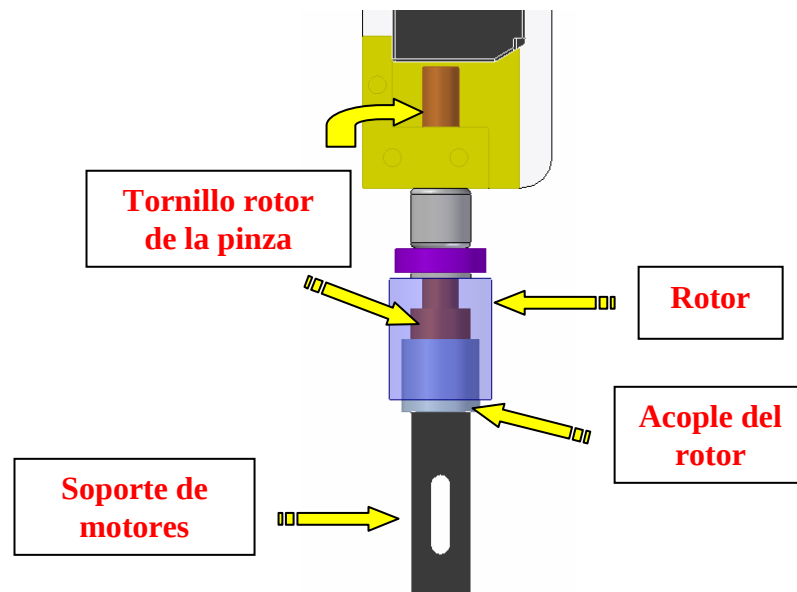
- **Rotor:** (Véase figura 31). Pieza dentro de la cual gira el tornillo rotor de la pinza.

Figura 31. Rotor.



- **Acople del rotor:** Pieza que permite el acople del conjunto del rotor en el soporte de los motores. En la figura 32 se observa el montaje del conjunto del rotor y su acople en el soporte de los motores (parte inferior de la imagen) y en el cubo de acople de la pinza (parte superior de la imagen).

Figura 32. Conjunto de acople del rotor.



3.2.3. Elevación del brazo

El mecanismo de transmisión de potencia permanece igual en esta sección (Véase figura 34). Se hicieron reformas al diseño del pasador, obteniendo un diseño más sencillo y de mayor facilidad de fabricación. La orquilla mantiene su diseño original. El pasador contiene ahora agujeros para sujetar el soporte de los motores (Véase figura 33).

Figura 33. Acople pasador y orquilla, reformas del diseño.

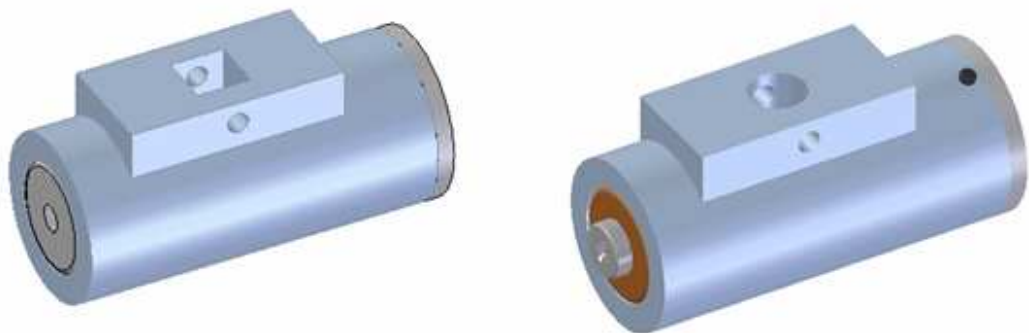
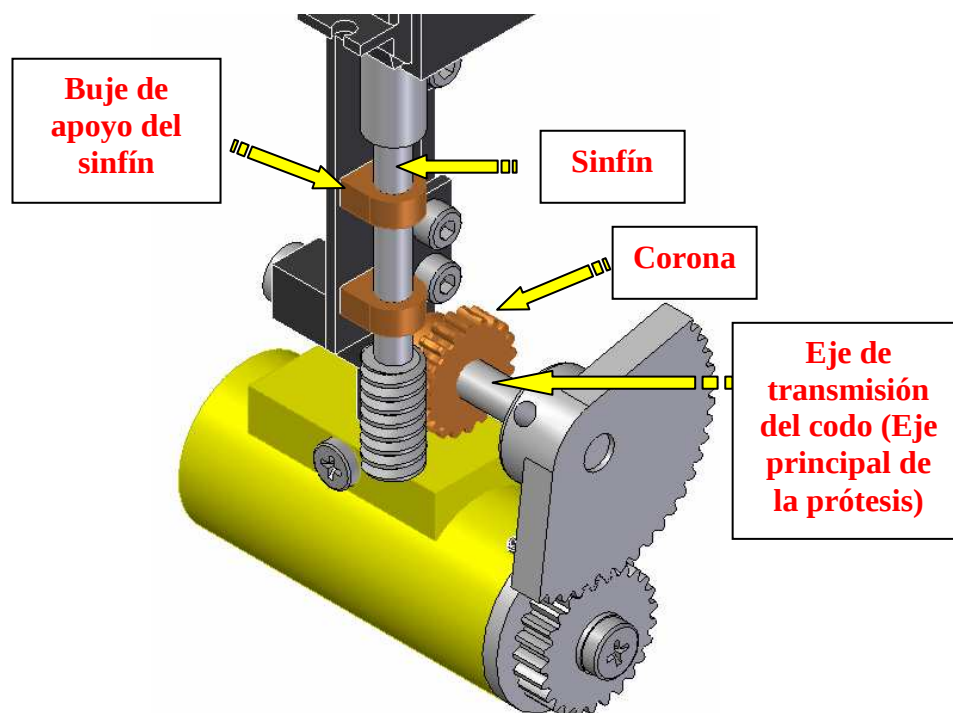


Figura 34. Eje de transmisión del mecanismo de codo.



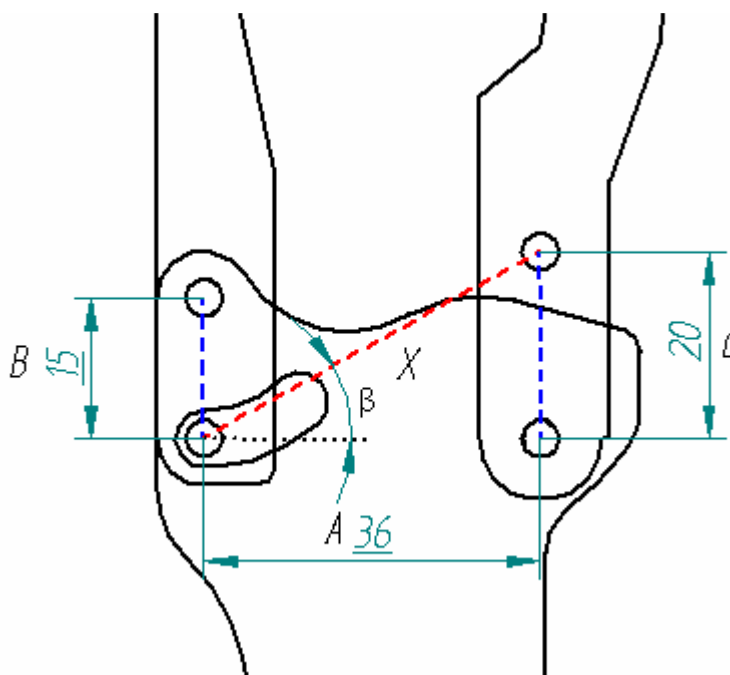
4. DISEÑO DETALLADO

En este capítulo se mostrarán los cálculos necesarios para el diseño de la pinza, estructura, mecanismo del codo y los elementos de transmisión de potencia (todas las unidades presentadas en este capítulo se encuentran en milímetros y los ángulos en grados). Posteriormente se anexarán los planos detallados de todas las piezas de la prótesis con todas y cada una de sus medidas (véase anexos A y B).

4.1. CÁLCULOS DE FUERZAS EN LA PINZA

Para completar el diseño de la pinza se analizaron las fuerzas que se originaban debido a la disposición de los centros de giro y los puntos de aplicación de las cargas en los dedos. Se predestinó una posición vertical de los dedos en la posición cerrada (Véase figura 35).

Figura 35. Disposición del mecanismo en posición cerrada.



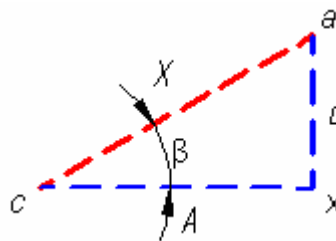
En el mecanismo de cuatro barras se asignaron las medidas de los segmentos A, B y C para conseguir condiciones de estética. Se asignaron las medidas procurando conservar una dimensión adecuada del mecanismo, del apoyo y de los dedos. El segmento X (color rojo) representa la incógnita en el mecanismo y corresponde a la longitud del eslabón de unión. Así mismo el ángulo β será el ángulo del eslabón de unión con la horizontal en la posición cerrada de la

pinza. De igual forma las longitudes asignadas permiten identificar la ubicación de los agujeros en los apoyos.

4.1.2. Cálculo de la longitud del eslabón de unión y su ángulo con el eje horizontal

Es preciso conocer las longitudes y disposiciones de los eslabones del mecanismo para poder determinar las fuerzas que se originan en la pinza.

Figura 36. Diagrama para análisis de longitudes del mecanismo.



$$A = 36mm$$

$$C = 20mm$$

$$X = ?$$

$$\beta = ?$$

Usamos el teorema de Pitágoras en el triángulo acx para el cálculo del segmento X (Véase figura 36).

$$X^2 = A^2 + C^2 \quad 4.1$$

$$X = \sqrt{36^2 + 20^2}$$

$$X = 41,18mm$$

Aplicando tangente en el triángulo anterior hallamos el ángulo con la horizontal β .

$$\tan \beta = \frac{C}{A} \quad 4.2$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{20}{36}$$

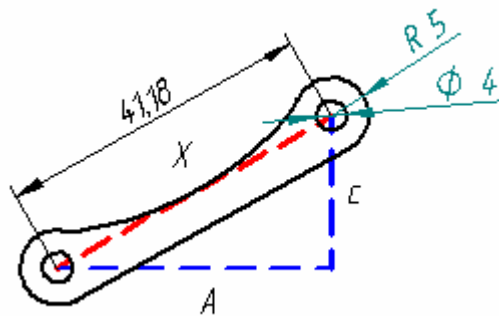
$$\beta = 29,05^\circ$$

Ahora se tiene la orientación y la dimensión del eslabón de unión. Con la longitud hallada en el anterior procedimiento se puede completar el diseño físico del eslabón.

Se realizó una distancia entre los centros del eslabón de 41,18mm (segmento X), se hicieron agujeros en esta pieza para ejes de diámetro de 4mm y concéntricos a estos agujeros se realizaron círculos de 10mm que van a formar el contorno del eslabón.

Finalmente, se delineó una curva en la parte superior de la pieza, tangente al eje que une los dos agujeros, con el fin de mejorar su apariencia. En la figura 37 se observa la disposición del eslabón de unión.

Figura 37. Disposición del eslabón de unión.



4.1.3. Cálculo de torque necesario en la pinza

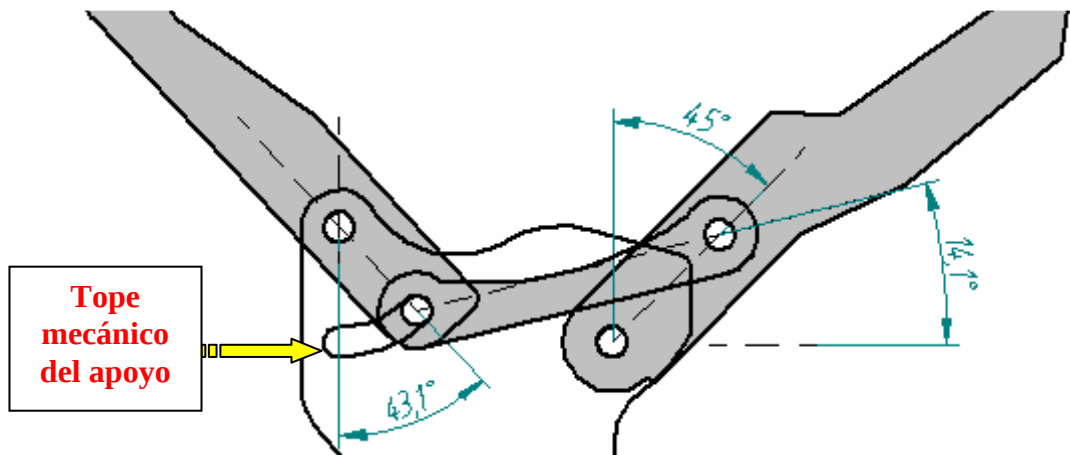
Luego de obtener todas las medidas y ángulos de los eslabones del mecanismo en la posición cerrada, se analizaron los radios de giro de los dedos.

Se asignó un ángulo de apertura de 45° para el dedo índice, es decir, desde su posición inicial hasta su posición final, o, completamente abierto, el dedo índice rotará 45° .

Ahora, mediante el CAD utilizado, (**SolidEdge**), se analizó el ángulo de rotación que correspondía al dedo pulgar, y, la posición final del eslabón de unión. En la figura 38 se observan los ángulos de la posición abierta del mecanismo, para una rotación de 45° del dedo índice, el dedo pulgar tiene una rotación de $43,1^\circ$ y el ángulo del eslabón de unión con la horizontal es de $14,1^\circ$.

En base a lo anterior, se realizó una ranura en el apoyo, la cual tiene una abertura $43,1^\circ$, y, constituye el tope mecánico que se había mencionado en el anterior capítulo. Este tope limita el movimiento del dedo pulgar hasta los $43,1^\circ$ protegiendo al mecanismo de una posición de autobloqueo. Estos datos serán necesarios para los cálculos que siguen.

Figura 38. Ángulos de rotación del dedo índice, pulgar y eslabón de unión.



- **Fuerza de agarre necesaria en la pinza**

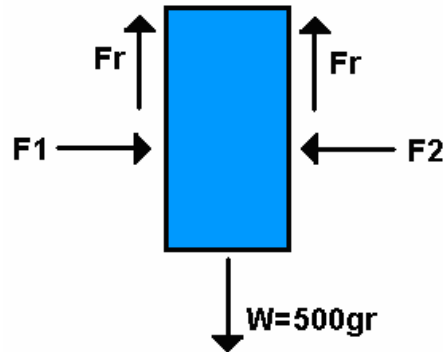
Se pretende sostener con la pinza un objeto de 500gr de masa. Para lograr esto se han analizado las fuerzas internas y externas que inciden en el mecanismo de la pinza.

Para prensar una masa de 500gr con la pinza sin que se deslice se necesita una carga de prensado P (F_1 y F_2) mínima. En la figura 39 se observan las fuerzas que ocasiona la pinza en un objeto cilíndrico de 500gr de masa al prensarlo (Véase figura 39).

En este momento es apropiado analizar la forma de sostener el objeto. De acuerdo al diseño establecido para la pinza se puede observar que el agarre del objeto será por constricción. Este tipo de agarre consiste en sujetar un objeto hasta que no se pueda mover [14]. Como se ha mencionado, las curvaturas en los dedos índice y pulgar se elaboraron para facilitar la sujeción de piezas cilíndricas. Sin embargo, otro aspecto importante para determinar las fuerzas necesarias para sujetar el objeto es el coeficiente de fricción, debido a que no se quiere sobrecargar el servomotor, o, deformar demasiado el objeto (en caso que se preme uno de superficie blanda). El coeficiente de fricción

entre el aluminio y el acero es 0,5¹. Para la sujeción de un polímero se estimó un coeficiente de rozamiento de 0,3 (véase tabla 1) por debajo de los valores que muestra la tabla. Este valor de fricción nos dará un mayor factor de seguridad para la selección del motor apropiado. En base a este factor de fricción se elaborarán los cálculos correspondientes.

Figura 39. Diagrama de cuerpo libre del objeto a sostener.



Para un coeficiente de rozamiento estático $\mu = 0,3$ tenemos:

$$\sum F_x = F_1 - F_2 = 0 \quad 4.3$$

$$\sum F_y = 2F_R + (-W) = 0 \quad 4.4$$

$$F_1 = F_2 = \frac{F_R}{\mu} \quad 4.5$$

Usando la ecuación 4.4 hallamos la fuerza de fricción necesaria para conservar un estado de equilibrio estático.

$$2F_R = (0,5)(9,8)$$

$$F_R = 2,45N$$

¹ Dato tomado de: NORTON, ROBERT L. Diseño de maquinaria, Capítulo 8, México, Mc. Graw Gill, 2000, tabla 8.7.

Tabla 1. Coeficientes de fricción.

	Coeficiente de fricción, μ
Metales al aire en contacto por sí solos	
Oro	2.5
Plata	0.8-1
Estaño	1
Aluminio	0.8-1.2
Cobre	0.7-1.4
Indio	2
Magnesio	0.5
Plomo	1.5
Cadmio	0.5
Cromo	0.4
Metales puros y aleaciones que se deslizan sobre acero (0.13% carbono) al aire	
Plata	0.5
Aluminio	0.5
Cadmio	0.4
Cobre	0.8
Cromo	0.5
Indio	2
Plomo	1.2
Cobre-20% plomo	0.2
Metal blanco (base de estaño)	0.8
Metal blanco (base de plomo)	0.5
α -latón (cobre-30% zinc)	0.5
Latón con plomo α/β (cobre-40% zinc)	0.2
Hierro gris fundido	0.4
Acero dulce (0.13% carbono)	0.8

Tomada de: HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Capítulo 8, México, Mc. Graw Gill, 2000

Reemplazando F_R en la ecuación 4.5 obtenemos la fuerza de agarre necesaria de la pinza.

$$F_1 = \frac{F_R}{\mu} = \frac{2,45N}{0,3} = 8,16N \rightarrow \text{Fuerza de agarre}$$

- **Torque necesario en la pinza**

El dedo transmisor del movimiento es el índice, por lo tanto, se debe hallar un torque necesario (M) en su centro de giro para que se puedan conseguir las cargas P en los dedos (véase figura 40). Se ha realizado este cálculo estático en una posición determinada de la pinza. Para hallar este torque se analizan

las fuerzas y sus ángulos en la posición abierta ya que es la posición en donde el mecanismo es menos eficiente. En la posición abierta la componente perpendicular de la fuerza F , Fy' , que es la que produce momento, es menor que en cualquier otra posición del mecanismo, por lo tanto la fuerza que le transmite el índice al pulgar es baja. A medida que se va cerrando el mecanismo ésta componente perpendicular va aumentando. Por esta razón se decidió hallar el torque en la posición abierta, esto dará un factor de seguridad para sostener el objeto.

$$F_1 = F_2 = \text{Carga } P \quad 4.6$$

o Análisis del dedo pulgar.

Haciendo sumatoria de fuerzas en el dedo pulgar

$$\sum F_Y = -P - Fy' + Qy = 0 \quad 4.7$$

Qy = Fuerza de reacción en el pivote Q .

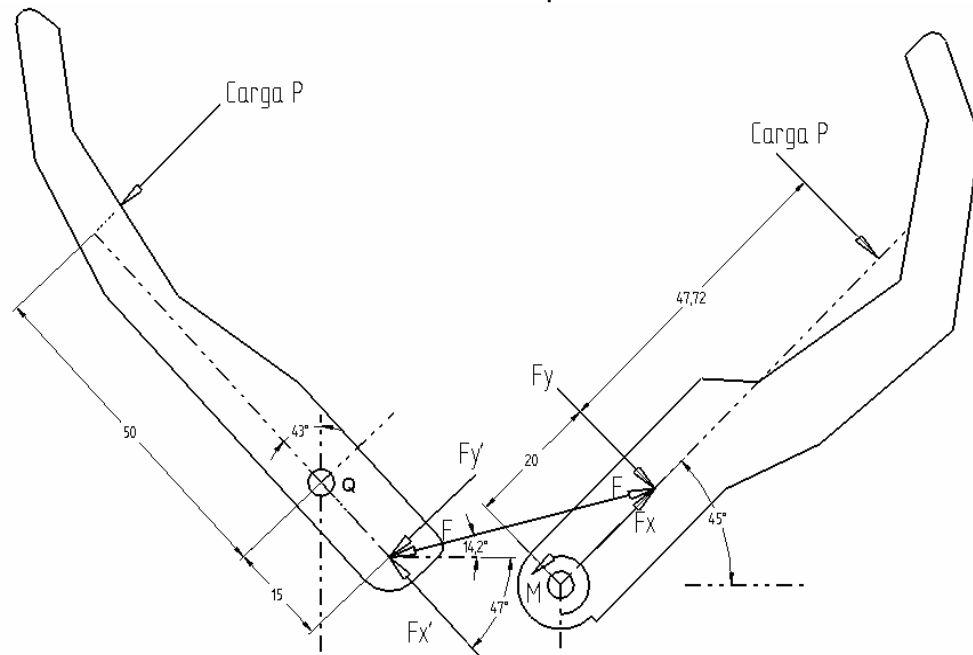
Utilizando sumatoria de momentos en Q para hallar Fy'

$$\sum M_Q = P(0,05m) - Fy'(0,015m) = 0 \quad 4.8$$

Despejando Fy' tenemos que,

$$Fy' = 27,2N$$

Figura 40. . Fuerzas en el mecanismo de la pinza.



Ahora se procede a calcular la fuerza F (magnitud de la fuerza) que deberá ser transmitida por el eslabón de unión.

$$\begin{aligned} Fy' &= F \sin(61,2^\circ) \\ F &= 31,04N \end{aligned} \quad 4.9$$

o Análisis del dedo índice.

Haciendo momentos en M.

$$\sum M = -P(0,06772m) - Fy(0,02m) + M = 0 \quad 4.10$$

$$\text{Teniendo en cuenta que:} \quad Fy = F \sin(30,8^\circ) \quad 4.11$$

Tenemos,

$$\begin{aligned} Fy &= 31,04N \times \sin(30,8^\circ) \\ Fy &= 15,9N \end{aligned}$$

Reemplazando Fy en ecuación 4.10 para hallar el torque M en el dedo índice.

$$\begin{aligned} -8,16N(0,06772m) - 15,9N(0,02m) + M &= 0 \\ -0,5525Nm - 0,318Nm + M &= 0 \\ -0,8705Nm + M &= 0 \\ M &= 0,8705Nm \end{aligned}$$

4.1.4. Cálculo del servomotor necesario

Como se mencionó anteriormente, para el diseño final de la pinza se optó por una transmisión por sinfín-corona teniendo en cuenta que este sistema permite aumentar el torque del servomotor.

Se diseñó de la siguiente forma:

Nº de dientes de la corona= 30
Nº de entradas del tornillo sinfín= 1
Diámetro del tornillo sinfín= 6mm
Diámetro exterior de la corona= 15mm
Diámetro interior de la corona= 4mm
Módulo de la transmisión= 0,5

Existen diferentes relaciones entre un tornillo sin-fin y su rueda. Si el número de los filetes (entradas) y revoluciones por minuto de un tornillo sin-fin son

conocidos así como el número de dientes de la rueda, se puede determinar el número de revoluciones de esta².

La fórmula es la siguiente:

$$\text{Revoluciones de la rueda} = (\text{N}^\circ \text{ de revoluciones del sin-fín} \times \text{N}^\circ \text{ de filetes}) / (\text{N}^\circ \text{ de dientes de la rueda})$$

Teniendo en cuenta la conservación de potencia en los ejes de transmisión, se puede decir que el número de dientes de la corona indicará el número de veces que se multiplicará el torque proveniente del servomotor. Igualmente, indicará la cantidad de veces en que se reducirá la velocidad angular del mismo. Para esto se tiene entonces:

$$Potencia = T \times \omega \quad 4.12$$

Siendo T el torque y ω la velocidad angular

Con la ecuación 4.12 se obtiene la relación de potencia entre el eje de entrada (eje₁) y el eje de salida (eje₂). Considerando las pérdidas por fricción en la transmisión como cero tenemos:

$$T_1 \times \omega_1 = T_2 \times \omega_2 \quad 4.13$$

Una vez obtenido el torque necesario en el pivote del dedo índice para prensar el objeto (torque M), se puede dividir entre el número de dientes de la corona, lo que corresponde a la reducción del torque necesario en el servomotor.

$$\frac{0,8705Nm}{30dientes} = 0,029Nm \rightarrow \text{Teniendo en cuenta transmisión.}$$

Se Asignó un factor de seguridad de 2 al torque del servomotor, por lo tanto el torque último necesario se obtiene de la siguiente forma:

$$0,029Nm \times 2 = 0,058Nm \rightarrow \text{Torque necesario del servomotor}$$

Al decidir la utilización de un servomotor, se consultaron las marcas comerciales más fáciles de obtener. Con esta investigación se encuentra que la marca de servomotores **FUTABA** era la que se adaptaba mejor a las necesidades del proyecto ya que ofrece una amplia gama de servomotores con diferentes especificaciones técnicas y tamaños, y, es ampliamente conocida.

Teniendo el torque de 0,058Nm, se analizaron los motores que poseían éste, o uno mayor, así como los tamaños y pesos existentes para cada uno.

² Tomado de: A.L. CASILLAS. Máquinas cálculos de taller, Capítulo 3, España, Ediciones máquinas, 32 edición, 1982..

Para poder hacer comparaciones en el listado de servomotores se expresó el torque del motor en unidades de oz-in.

$$1\text{oz} \rightarrow 28,35\text{g}$$

$$0,058\text{Nm} \Rightarrow 8.16\text{oz.in}$$

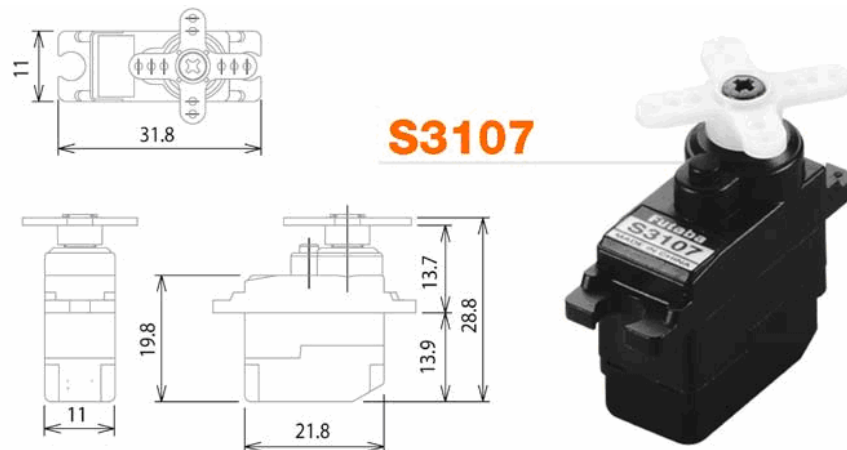
Se encontró entonces que el servomotor, a la fecha, con el torque mayor más cercano al que hallamos, que se encontraba en stock, era el de la referencia **MICROSERVO FUTABA S3107** (Véase figura 41), el cual tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 2. Especificaciones técnicas del servomotor de la pinza.

VOLTAJE	TORQUE	VELOCIDAD ANGULAR
4,8V	17 oz.-in	0,12 seg./60°
DIMENSIONES		PESO
0,9 x 0,4 x 0,8 in.		0,3 oz.

Tomada de: FUTABA, Standard servos: <http://www.futaba-rc.com/servos/servos.html>

Figura 41. Servomotor FUTABA S3107 Micro.



Tomada de: FUTABA, Standard servos: <http://www.futaba-rc.com/servos/specs-lineart/specs-futm0025.html>

17 oz-in equivalen en el sistema internacional de medidas a 0,118Nm. Se observa aquí, que el factor de seguridad para el servomotor aumenta en 2.1 del factor de seguridad estimado inicialmente.

En base a las especificaciones de velocidad angular del motor se tiene que:

$$\omega_{motor} = 0,12 \text{seg} / 60^\circ$$

$$\omega_{motor} = 0,72 \text{seg} / 360^\circ \rightarrow 0,72 \text{seg} / 1 \text{rev}$$

$$\omega_{motor} = 1,388 \text{rps}$$

Por una vuelta del tornillo sinfín la corona avanza un diente debido a que éste posee una sola entrada. Para un rango de apertura del índice de 45° se tiene:

$$360^\circ \rightarrow 30 \text{dientes}$$

$$45^\circ \rightarrow 3,75 \text{dientes}$$

$$3,75 \text{rev} \rightarrow 3,75 \text{dientes}$$

$$3,75 \text{rev} \times 0,72 \text{s} = 2,7 \text{seg}$$

Se puede concluir entonces, que la pinza se abrirá completamente en un tiempo aproximado de 2,7 segundos a 4,8V.

Ahora bien, los servomotores de estas especificaciones solamente pueden girar un ángulo de 180° . Para esta aplicación es necesario que el motor gire 360° ya que el tornillo sinfín dará 3,75 vueltas. Para subsanar este inconveniente se desarmó el servomotor y se quitó el tope mecánico que trae de fábrica, al eliminar este tope se consigue que el servo pueda dar las revoluciones que se necesitan.

4.1.5. Asignación del material de los elementos de la pinza

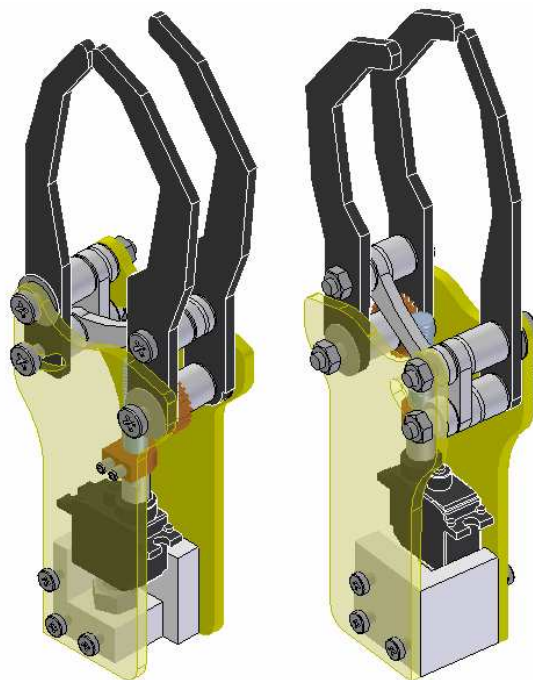
Luego de conocer el comportamiento y la apariencia de la pinza en dos dimensiones (x, y) se procede a completar la otra dimensión (z), aspecto que permite conocer la forma de la pinza en el espacio. En este momento aparecen los bujes de separación de los dedos (Véase figura 42), estos bujes permitirán conseguir una adecuada consistencia de la pinza, conservando espacios entre dedo y dedo y entre los apoyos. Junto con el cubo de acople, los bujes de separación son los responsables de dar un perfecto ajuste a la pinza.

- Para los bujes de separación de los dedos se asignó **Aluminio** por el bajo peso que presenta y por ser un material económico en comparación con otros materiales livianos.
- Para la fabricación de cada uno de los dedos, de los apoyos y del eslabón de unión, se asignó un material de **lámina de Aluminio de 3mm de espesor**, por su peso y resistencia apropiada para esta aplicación.

Igualmente, el aluminio es un material resistente a la corrosión lo que favorece la estética e higiene de la prótesis.

- Para el cubo de acople se asignó **Aluminio** ya que en esta pieza habrá de realizarse un maquinado considerable. El aluminio presenta buenas características de peso y facilidad de procesamiento.
- Para los bujes de apoyo del sinfín de la pinza se asignó **Bronce** debido a sus características de auto lubricación que permitirán al tornillo sinfín girar más fácilmente.
- Para las láminas de soporte del servomotor se asignó lámina de acero galvanizado calibre 22 por su condición maleable y resistencia a los esfuerzos que allí se presentan.
- Para la sujeción de los apoyos en el cubo de acople se asignaron **tornillos milimétricos de 3mm de rosca con cabeza hexagonal**.
- Para los ejes de los dedos se asignaron **tornillos milimétricos de 4mm de rosca de cabeza hexagonal con sus respectivas tuercas**.
- Para la sujeción de los bujes de apoyo del sinfín, en uno de los apoyos, se asignaron **tornillos y prisioneros de rosca milimétrica de 3mm de diámetro**.

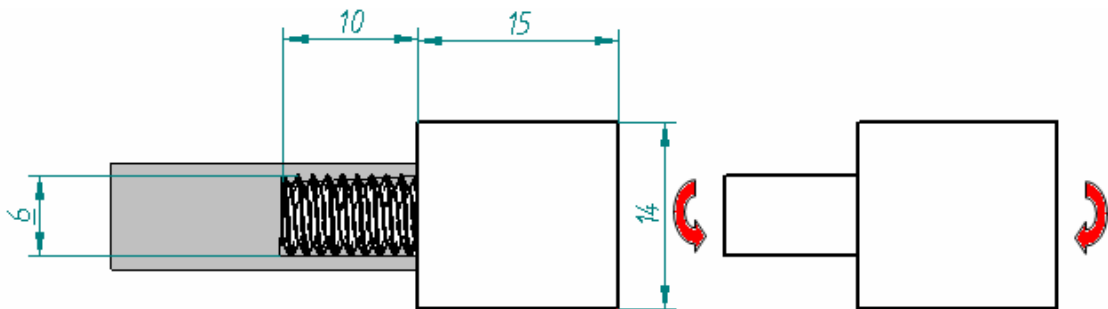
Figura 42. Pinza terminada.



4.2. CÁLCULO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL ACOPLE DEL ROTOR Y SELECCIÓN DEL MATERIAL

Teniendo en cuenta los esfuerzos que aparecen en las piezas debido a la sujeción del objeto de 500g, se concluye que en la pieza llamada **acople del rotor** puede presentarse un esfuerzo de flexión considerable. Para comprobar si las dimensiones asignadas y el material son aceptables o no, se hizo el cálculo de esfuerzo a la flexión de esta pieza de la prótesis (véase figura 43).

Figura 43. Esfuerzo de flexión en acople del rotor.



Haciendo el análisis del acople del rotor como un eje con sección transversal variable se obtiene:

$$\sigma_{Pr om} = M \times \frac{c}{I} \times K_C = 32 \frac{M}{\pi d^3} \times K_C \quad 4.14$$

Para la concentración de esfuerzos presente en el cambio de sección transversal de la pieza tenemos en cuenta K_C , que corresponde al factor de concentración de esfuerzos. En base en la figura 44 se puede obtener el K_C que corresponde al caso planteado.

Para un $\frac{r}{d} = 0,1$ y un $\frac{D}{d} = 2,3$ tenemos un $K_C = 1,8$.

$$M = (0,5Kg + 0,2905Kg) \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,155m = 1,2Nm$$

Reemplazando en ecuación 4.14 para hallar el $\sigma_{Pr om}$.

$$\sigma_{Pr om} = 32 \frac{1,2Nm}{\pi(0,006)^3} \times 1,8 = 101924480,8Pa$$

$$\sigma_{prom} = 101,924 MPa$$

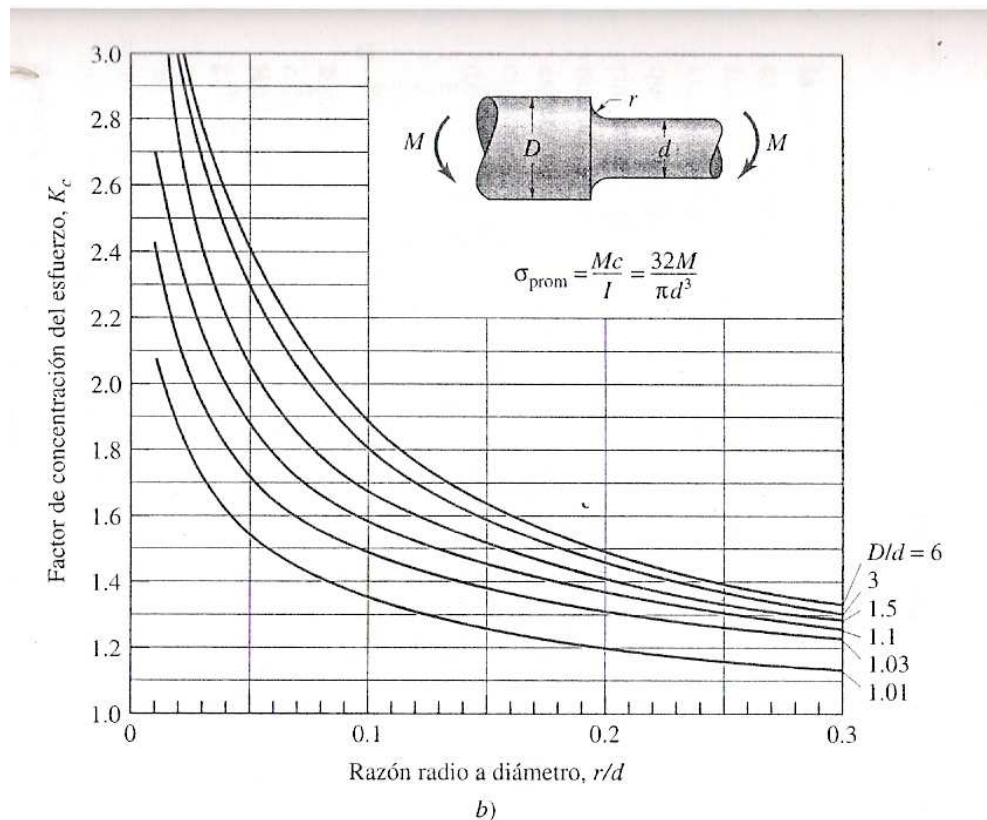
Factor de seguridad:

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma_{prom}}$$

$$n_s = \frac{304.7 Mp}{101.924 Mp}$$

$$n_s = 2.9$$

Figura 44. Factor de concentración de esfuerzos para barras redondas con filetes



Tomada de: HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Capítulo 6, México, Mc. Graw Gill, 2000).

Teniendo en cuenta que se usará para esta pieza un **Acero inoxidable austenítico AISI 304** con un Límite de fluencia de $304,7 MPa^3$, se concluye que

³ Dato Tomado de: FELICELLI, S, QUINTANA F, [en línea]: [citado en 2007-07-07]. Página 3. Disponible en Internet: <http://www.cab.cnea.gov.ar/AATN99/Actas/Docs/R2B66.pdf>,

la pieza llamada acople del rotor podrá resistir al someterse a los anteriores esfuerzos teniendo en cuenta que el factor de seguridad hallado es de 2.9 aproximadamente.

El acero inoxidable AISI 304, es el acero que tiene mayor demanda en el mercado regional y fue el que se logró conseguir tras haber consultado en las empresas comercializadoras de metales de la ciudad de Bucaramanga, por tal motivo, se usó el dato de esfuerzo de fluencia de este acero en particular.

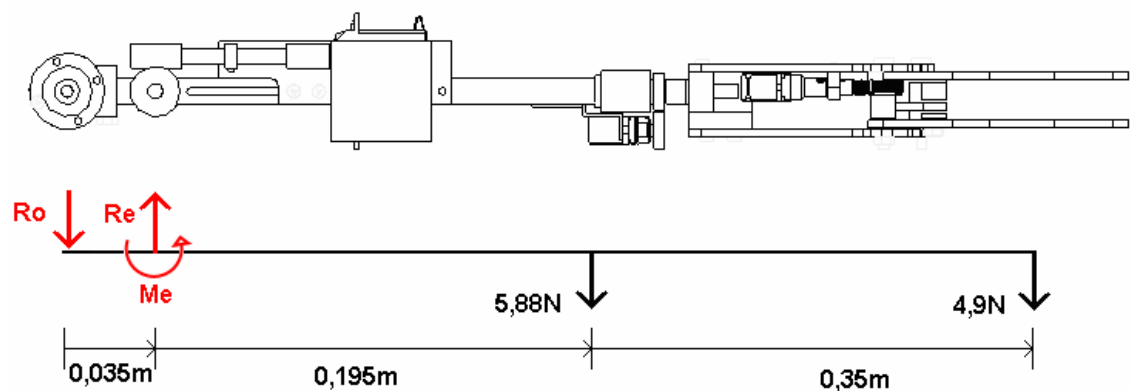
4.3. CÁLCULOS DE FUERZAS EN EL SOPORTE DE LOS MOTORES

En el momento de la sujeción del objeto el soporte de los motores sufre un esfuerzo de flexión que se debe considerar para comprobar la resistencia del material. En este subtítulo se determinará el esfuerzo al que se somete el soporte de los motores con las dimensiones asignadas en el diseño y para un material de aluminio .

4.3.1. Análisis estático

Para el cálculo del esfuerzo en el soporte de los motores se analizaron las fuerzas en la posición horizontal del brazo, que es la posición en donde las cargas son mayores (véase figura 45).

Figura 45. Diagrama de cuerpo libre de la prótesis.



$$\begin{aligned}
 \sum M_E &= 0 \\
 -5,88N(0,16m) - 4,9N(0,315) + R_O(0,035m) + R_E(0,025m) &= 0 \\
 R_O(0,035m) + R_E(0,025m) &= 2,4843Nm
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

$$\sum F_y = -R_0 + R_E - 5,88N - 4,9N = 0$$

$$R_E - R_0 = 10,78N \quad 4.16$$

Despejando R_E de la ecuación 4.16 y reemplazando en la ecuación 4.15:

$$R_E = 10,78N + R_0$$

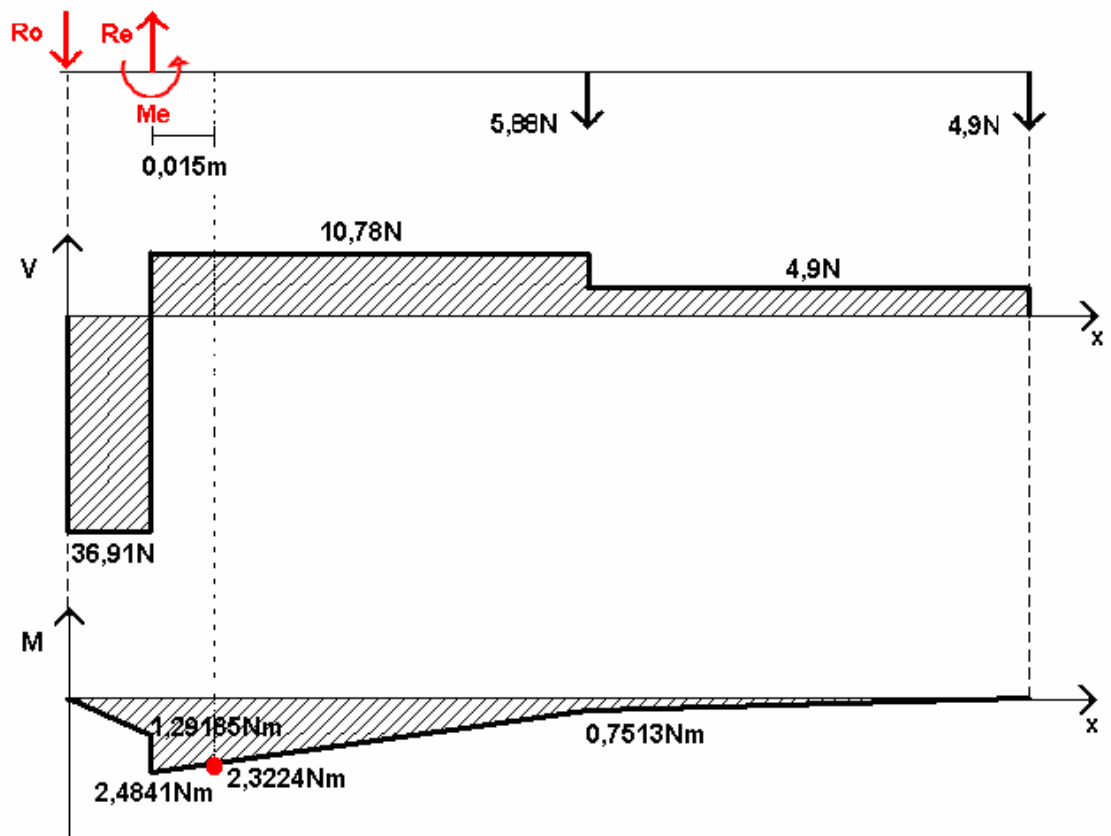
$$R_0(0,035m) + (10,78N + R_0)(0,025m) = 2,4843Nm$$

$$R_0(0,06m) = 2,2148Nm$$

$$R_0 = 36,91N$$

$$R_E = 47,69N$$

Figura 46. Diagramas de cortante y momento flector del soporte de los motores.



4.3.2. Cálculo de esfuerzo en el soporte de los motores

Para determinar el esfuerzo total en el soporte de los motores se deben identificar los puntos críticos. Para esto se tiene:

- Análisis en la posición del eje principal

$$\frac{MC}{I} = \frac{S_y}{n_s} \quad 4.17$$

Donde:

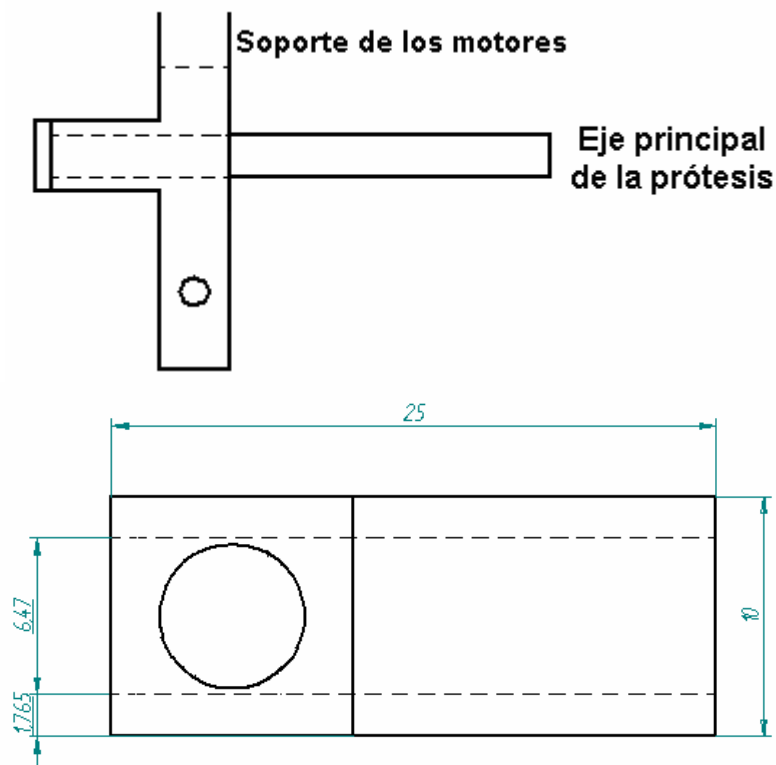
$$M = 2,4841$$

$$C = 0,005m$$

$$I = \left(\frac{1}{12}bh^3 + bhy^2 \right) \times 2$$

$$n_s = 2$$

Figura 47. Zona crítica 1º del soporte de los motores.



Reemplazando en la ecuación 4.17,

$$\frac{2,4841Nm(0,005m)}{\left(\frac{1}{12}(0,025m)(0,001765m)^3 + (0,025m)(0,001765m)((4,1175 \times 10^{-3}m)^2)\right)} = \frac{S_y}{n_s}$$

$$\frac{17Mpa}{n_s} = 8,176312727Mp \Rightarrow 2,07$$

$$n_s = 2,07$$

- Análisis en la ranura

$$\frac{MC}{I} = \frac{S_y}{n_s}$$

Donde:

$$M = 2,3224Nm$$

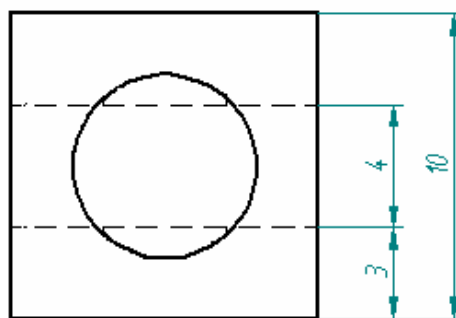
$$C = 0,005m$$

$$h = 0,003m$$

$$b = 0,010m$$

$$y = 0,0035m$$

Figura 48. Zona crítica 2º, ranura del soporte de los motores.



Reemplazamos en la fórmula 4.17,

$$\frac{2,3224Nm(0,005m)}{\left(\frac{1}{12}(0,01m)(0,003m)^3 + (0,01m)(0,003m)((35 \times 10^{-3}m)^2)\right)} = \frac{S_y}{n_s}$$

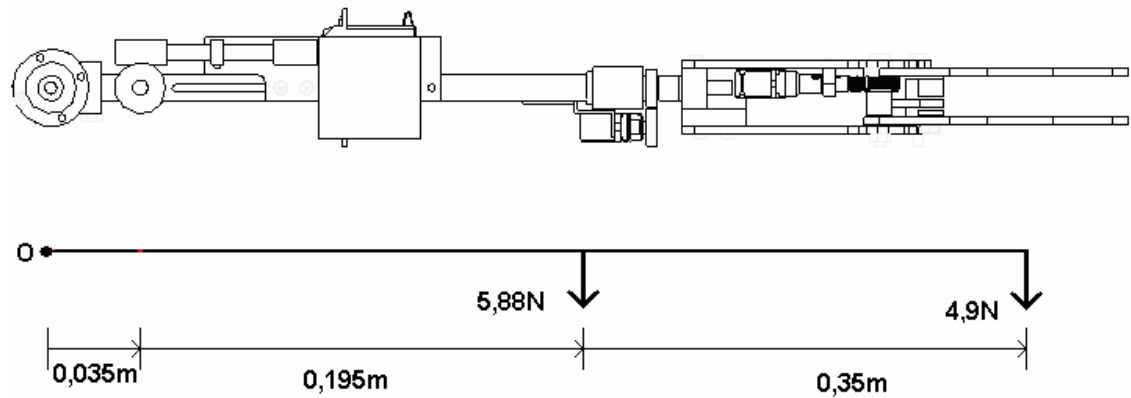
$$\frac{17Mp}{n_s} = 14,88717949Pa \Rightarrow 1,14$$

$$n_s = 1,14$$

4.4. CÁLCULOS DE ESFUERZO EN EL EJE PRINCIPAL

Analizando el tipo de mecanismo y la forma del movimiento del codo se identificaron los esfuerzos a los que se sometería el eje principal de la prótesis. El eje principal de la prótesis es el eje que se encarga de transmitir la potencia desde la corona (mecanismo del codo) hasta el piñón que producirá el ascenso, así mismo, este eje es el que eleva el soporte de los motores. Se observa que en el eje se presenta un esfuerzo de torsión debido a la acción de la corona (T) y a la reacción del piñón de ascenso (T') en el momento del bloqueo del mecanismo (cuando el sistema está quieto) y/o en el momento del propio ascenso del brazo, y, un esfuerzo de flexión, debido a la acción del piñón en el bloqueo o ascenso (R_E) y a la fuerza de reacción que produce el soporte de los motores (R_E') (véase figura 46).

Figura 49. Diagrama de cuerpo libre de la prótesis.



$$\sum M_O = -4,9N(0,35m) - 5,88N(0,195m) = 0$$

$$M_O = 2,8616Nm$$

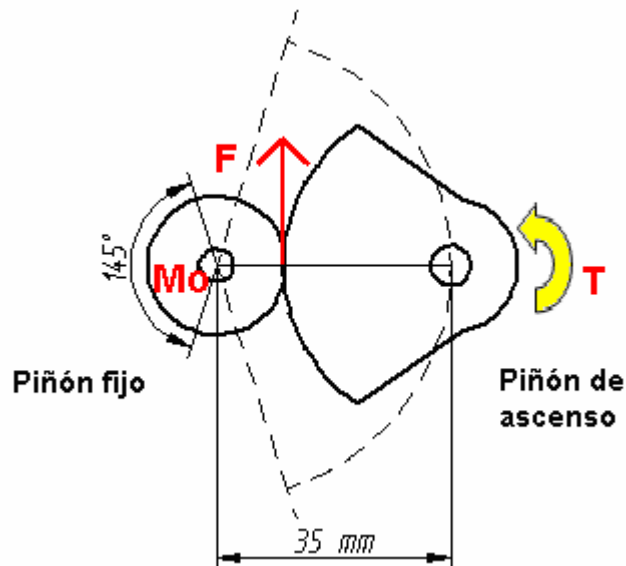
Para la transmisión del codo se diseñaron dos piñones rectos los cuales tienen una relación de 0,5, que se consigue con un piñón de 50 dientes (piñón conductor) y otro de 25 dientes (conducido) con una distancia entre centros de 35mm.

$$M_O = F \times r \quad 4.15$$

$$F = \frac{2,8616Nm}{0,0125m}$$

$$F = 228,928N$$

Figura 50. Fuerza en el piñón de ascenso.



4.4.1. Cálculo del motor necesario

El torque T en el piñón de ascenso corresponde al torque necesario para su ascenso y al mismo tiempo indica el torque que debe vencer el motor.

$$T = F \times R \quad 4.16$$

Donde R corresponde al radio del piñón de ascenso.

$$T = 228,928N \times 0,025m = 5,7232Nm \rightarrow \text{Torque necesario en el eje principal de la prótesis}$$

Para el mecanismo de ascenso del codo se usará una transmisión por sinfín-corona el cual se diseñó de la siguiente forma:

Nº de dientes de la corona= 20
 Nº de entradas del tornillo sinfín= 1
 Diámetro del tornillo sinfín= 10mm
 Diámetro exterior de la corona= 20mm
 Diámetro interior de la corona= 6,35mm

Módulo de la transmisión= 3,2

Teniendo en cuenta la transmisión utilizada en este mecanismo y la conservación de potencia en los ejes, se puede decir que:

$$T_{Motor} = \frac{5,7232Nm}{N^{\circ}dientesCorona} \times n = \frac{5,7232Nm}{20} \times n = 0,28616Nm \times n$$

$$1oz \rightarrow 28,35g$$

$$0,28616Nm \Rightarrow 40,3042oz.in$$

Para el motor del codo se asignó un factor de seguridad de 3 ya que el control de la carga en él, es buena, pero la experiencia con este tipo de motores es pobre, y éste aumento representado en cifras corresponde a 120,9126oz.in .

Como se usará también un servomotor Futaba, al mirar en la lista de servomotores se selecciona el motor que corresponde al torque calculado o uno mayor. Con esta consulta se selecciona el motor **Futaba S9206** (véase figura 51), el cual tiene las siguientes características:

Tabla 3 Especificaciones técnicas del servomotor del codo.

VOLTAJE	TORQUE	VELOCIDAD ANGULAR
4,8V	131,7 oz.-in	0,19 seg./60°
DIMENSIONES		PESO
1,6 x 0,8 x 1,5 in.		1,9 oz.

Tomada de: FUTABA, Standard servos: [citado en 2007-07-04]: <http://www.futaba-rc.com/servos/servos.html>.

Figura 51. Servomotor Futaba S9206.



Tomada de: FUTABA, Standard servos: [citado en 2007-07-04]:
<http://www.futaba-rc.com/servos/specs-lineart/specs-futm0115.html>

4.4.2. Cálculo de esfuerzos en el eje principal

Para calcular el esfuerzo total que soporta el eje principal, el cual como se mencionó anteriormente, sufre esfuerzo por torsión y por flexión (véase figura 52), se debe utilizar un método que permita relacionar esfuerzos que actúan en planos diferentes, ó, carga combinada con un esfuerzo total resultante. El método que usamos es el de **la Energía de la Distorsión DET**.

- **Esfuerzo normal en la dirección x**

$$\sigma_x = \frac{M \times c}{I} \quad 4.17$$

Donde:

$$M = 6,409984, C = \frac{d}{2}, I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Reemplazando en la ecuación 4.16 se obtiene que:

$$\sigma_x = \frac{65,29156088 N.m}{d^3}$$

- Esfuerzo cortante τ_{xy}

$$\tau_{xy} = \frac{Tc}{J} \quad 4.18$$

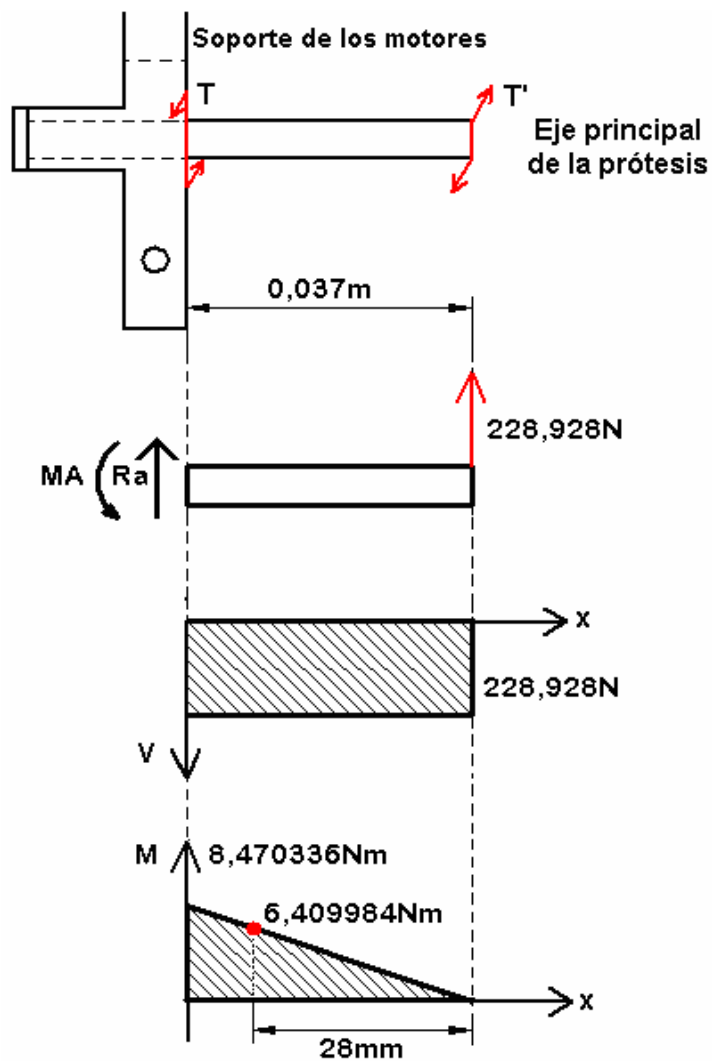
Donde:

$$T = 5,7232Nm, \quad C = \frac{d}{2}, \quad J = \frac{\pi d^4}{32}$$

Reemplazando en ecuación 4.17 obtenemos que:

$$\tau_{xy} = \frac{29,14801825Nm}{d^3}$$

Figura 52. Diagrama de fuerzas, de cortante y de momentos en eje principal.



Ecuación de la energía de la distorsión:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2} \pm \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \sigma_1, \sigma_3 \quad 4.19$$

$$\sqrt{\left(\frac{32,64578044}{d^3}\right)^2 + \left(\frac{29,14801825}{d^3}\right)^2} = \sqrt{\frac{1065,746981}{d^6} + \frac{849,6069679}{d^6}} =$$

$$\sqrt{\frac{1915,353948}{d^6}} = \frac{43,76475693}{d^3}$$

$$\sigma_1 = \frac{43,76475693}{d^3} + \frac{32,64578044}{d^3} = \frac{76,41053737}{d^3}$$

$$\sigma_3 = \frac{43,76475693}{d^3} - \frac{32,64578044}{d^3} = \frac{11,11897649}{d^3}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{n_s} \quad 4.20$$

Reemplazando en ecuación 4.19:

$$\frac{76,41053737}{d^3} - \frac{11,11897649}{d^3} = \frac{S_y}{n_s}$$

Para la construcción del eje se usará un material de Acero inoxidable austenítico AISI 304 el cual tiene un límite de fluencia $S_y = 304,7 MPa$.

Con un factor de seguridad $n_s = 1,2$ se tiene:

$$\frac{65,29156088}{d^3} = \frac{304,7 \times 10^6 Pa}{1,2}$$

Despejando el diámetro de la anterior ecuación se obtiene el diámetro de diseño del eje:

$$d = \sqrt[3]{2,571377521 \times 10^{-7}}$$

$$d = 6,35 mm$$

5. ANALISIS VIRTUAL DE ESFUERZOS

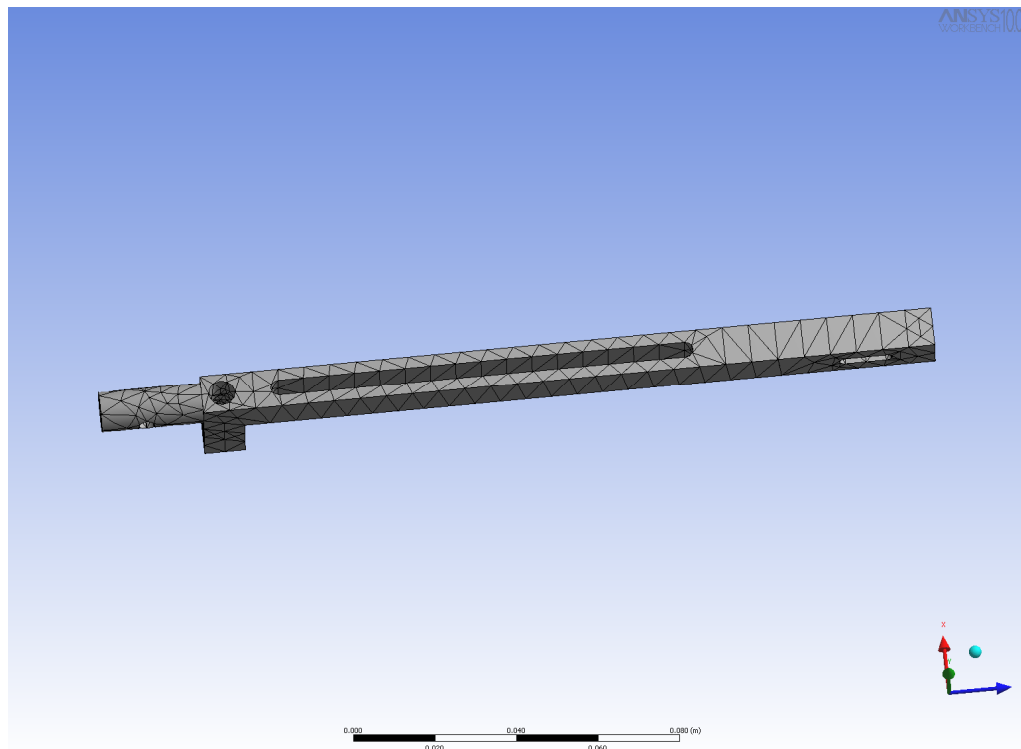
Para analizar el comportamiento de las piezas de la prótesis que soportaban esfuerzos considerables, se utilizó la simulación por elementos finitos. Con los resultados obtenidos se podrá comprobar la resistencia de las piezas analizadas inicialmente con diferentes fundamentos de diseño.

5.1. Análisis virtual del soporte de los motores

Para la pieza mencionada se comenzó por realizar el enmallado adecuado, el cual permite analizar los diferentes puntos de un elemento. Estos puntos se conocen como nodos y es en donde el software efectúa los cálculos necesarios para conocer el comportamiento de la pieza o sistema. Una vez realizado el enmallado adecuado e identificado los nodos, el software procede a resolver las ecuaciones que provienen de cada nodo.

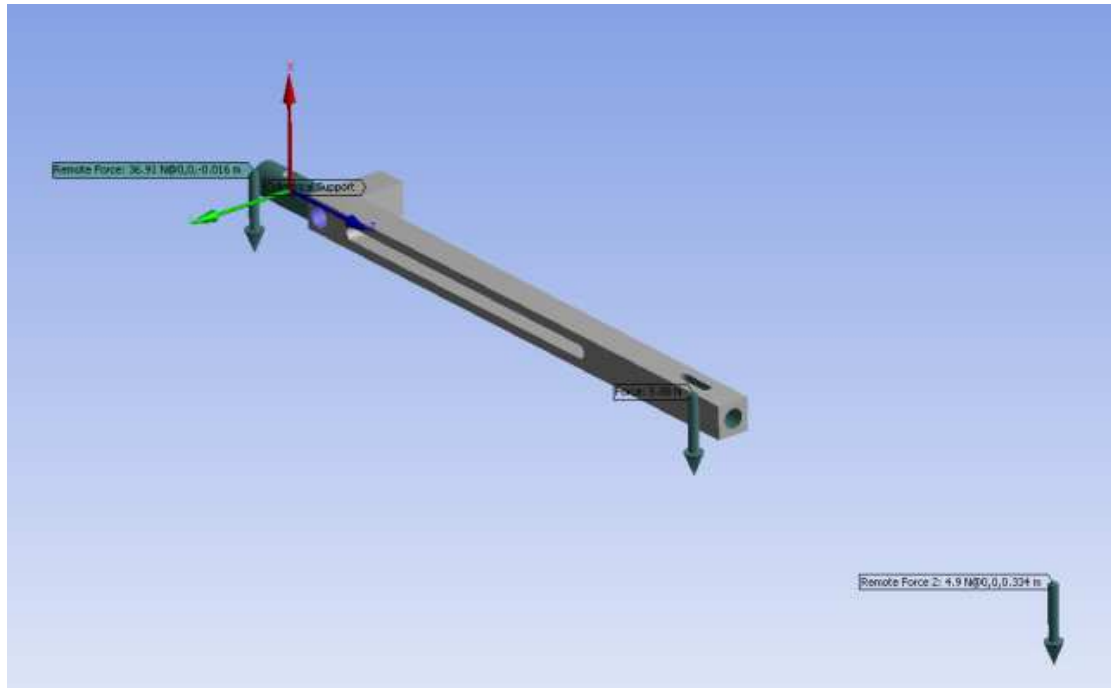
En la figura 54 se observa el enmallado realizado para el soporte de los motores.

Figura 53. Enmallado del soporte de los motores.

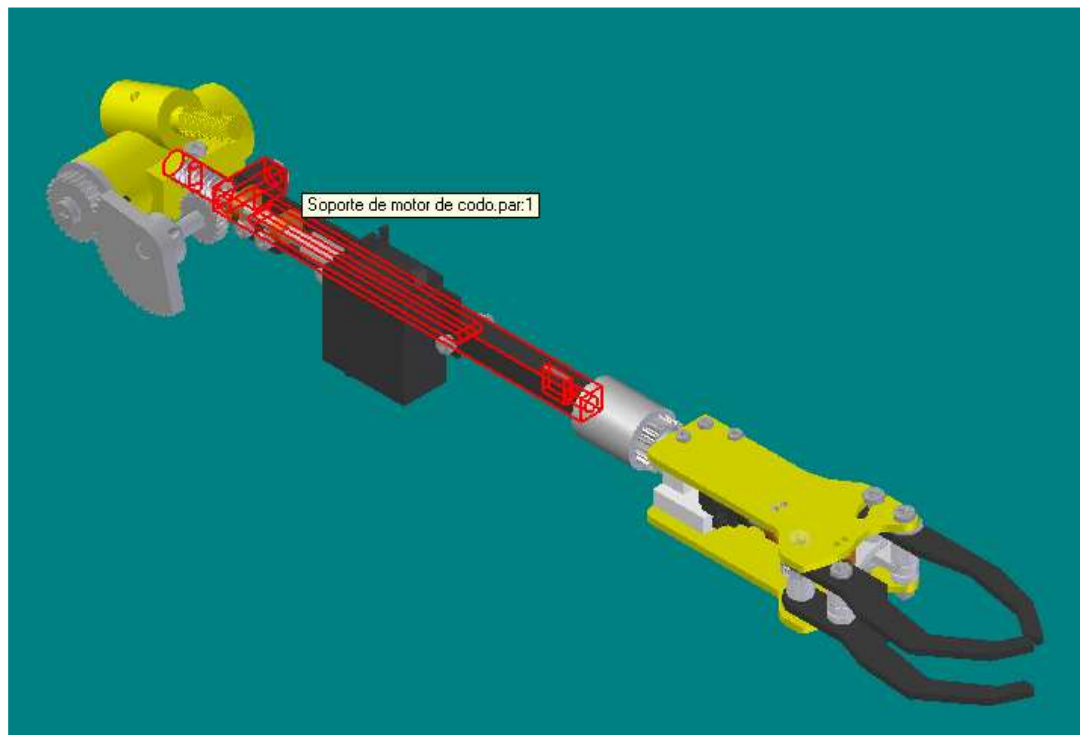


Luego de realizar el enmallado se procede a realizar el ambiente de cargas a las que esta sometida la pieza obteniendo lo siguiente (véase figura 55):

Figura 54. a) Fuerzas externas del soporte de los motores, b) ubicación de la pieza en el sistema.



a.



b.

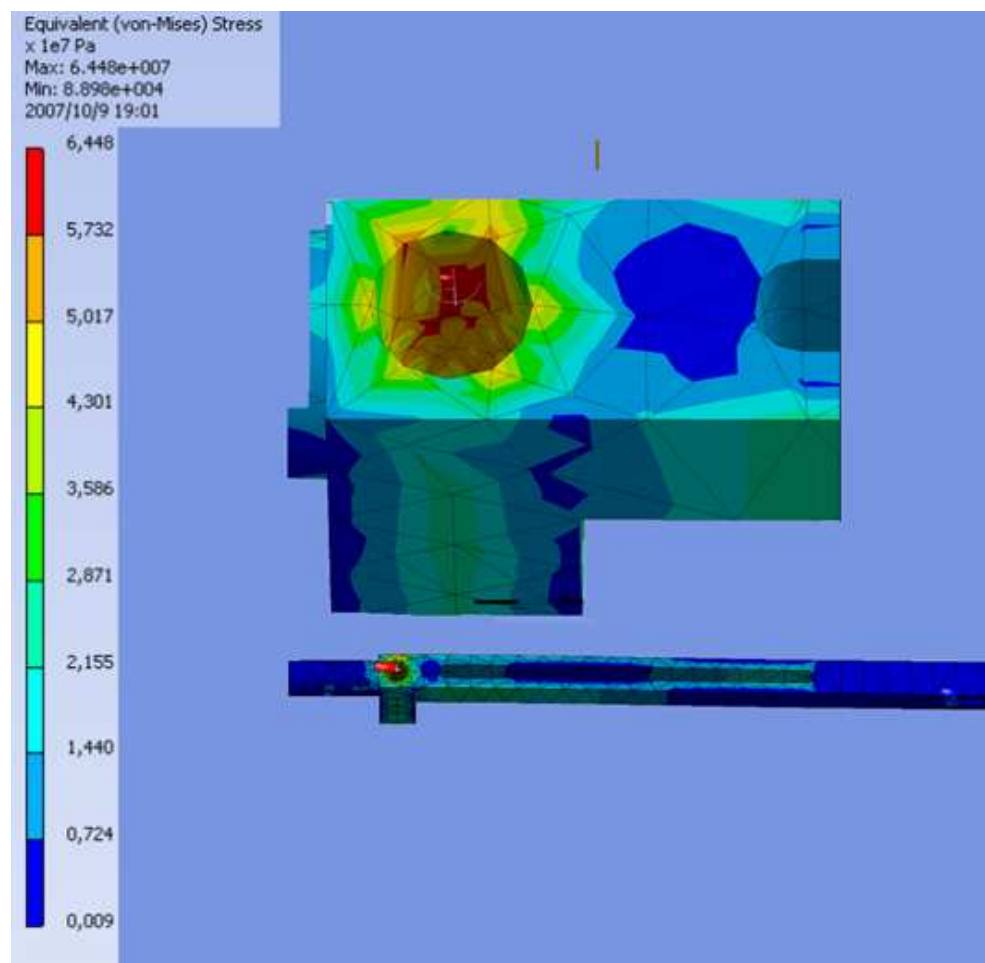
Una vez planteado el ambiente de cargas para la pieza, se describe en el programa el tipo de análisis que se quiere realizar. En el software se utilizan con frecuencia dos tipos de análisis para la resistencia de materiales que son el análisis según el criterio de Von-Mises y el análisis según la teoría del esfuerzo cortante máximo. Para el soporte de los motores es necesario saber el factor de seguridad cuando actúa bajo las cargas representadas anteriormente.

Se realizará entonces el análisis según los dos criterios y se escogerá el resultado mas critico, y asi, obtener una mayor confiabilidad.

Efectuando el análisis según el criterio de Von-Mises se observa que el comportamiento de la pieza corrobora la viabilidad observada en los cálculos realizados anteriormente.

La franja de colores va desde el color azul que indica la zona de bajos esfuerzos hasta el rojo que indica la zona crítica y de altos esfuerzos. Con esto se puede conocer la ubicación del punto crítico de la pieza (véase figura 56 y 57).

Figura 55. Distribución de esfuerzos en el soporte de los motores según Von-Mises.



Con el resultado observado en la anterior figura se puede identificar la zona crítica de la pieza y en ella el esfuerzo máximo que corresponde a $6,448 \times 10^7 Pa$.

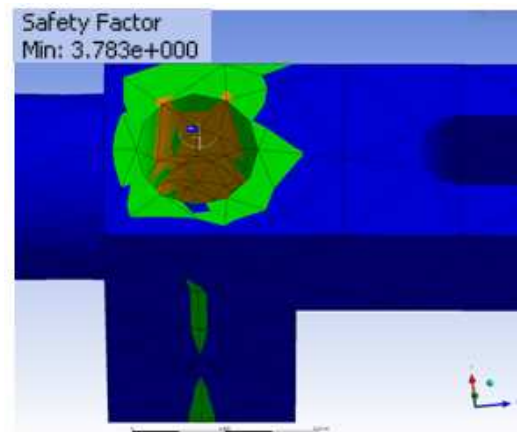
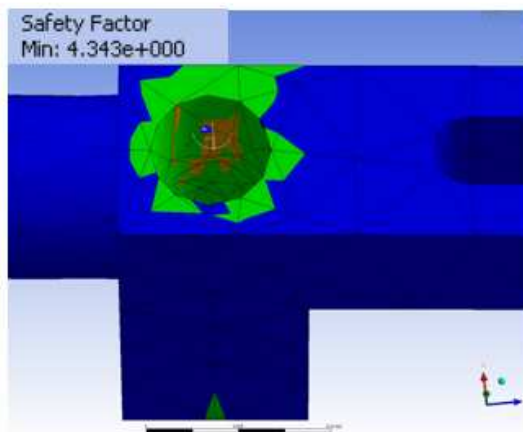
Figura 56. Distribución de esfuerzos en el soporte de los motores según teoría del esfuerzo cortante máximo.



Con la anterior figura se puede observar el resultado del análisis según el esfuerzo cortante máximo. Se conserva la zona crítica en la pieza pero con una disminución del esfuerzo que se da en ese punto el cual es de $3,701 \times 10^7 Pa$.

5.1.1. Factores de seguridad en el soporte de los motores

- Factor de seguridad según Von-mises.
- Factor de seguridad según esfuerzo cortante máximo



En las dos soluciones se observa que el factor de seguridad para la pieza es mayor que 1 (Von-mises = 4,343 y Esfuerzo cortante máximo = 3,783). Igualmente se corroboran con este análisis las conclusiones obtenidas con los cálculos realizados anteriormente y se comprueba nuevamente que la pieza

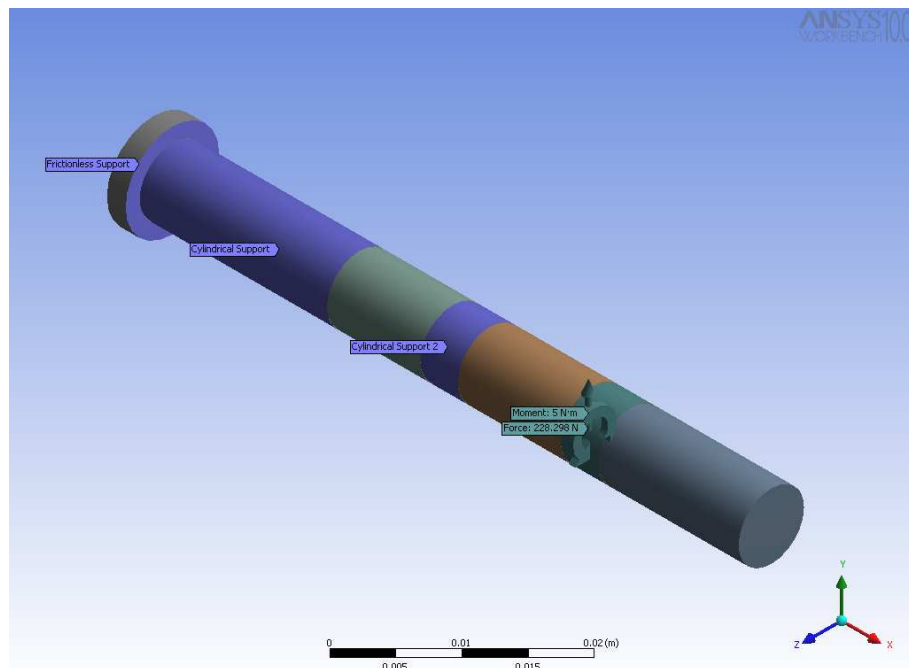
resiste. Analizando los valores según los dos criterios se conoce que el factor de seguridad según el esfuerzo cortante máximo es más bajo.

5.2. Análisis virtual del eje principal de la prótesis

Se planteó el ambiente de cargas para el eje. El eje como se mencionó anteriormente está sometido a esfuerzos de flexión y de torsión. En la figura 58 se puede observar el planteamiento de cargas en el software.

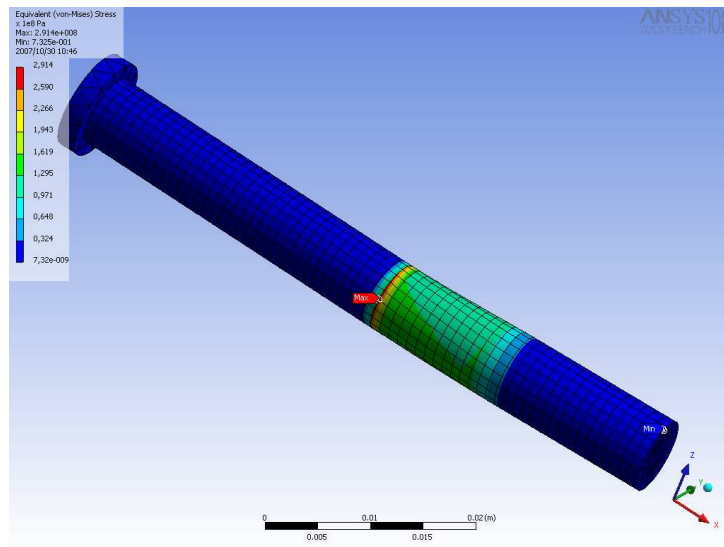
Para conseguir los esfuerzos en la pieza se ubicaron dos apoyos en el eje; uno que le permite girar libremente y otro que le genera resistencia simulando la que genera la transmisión de piñones.

Figura 57. Ambiente de cargas para el eje principal.



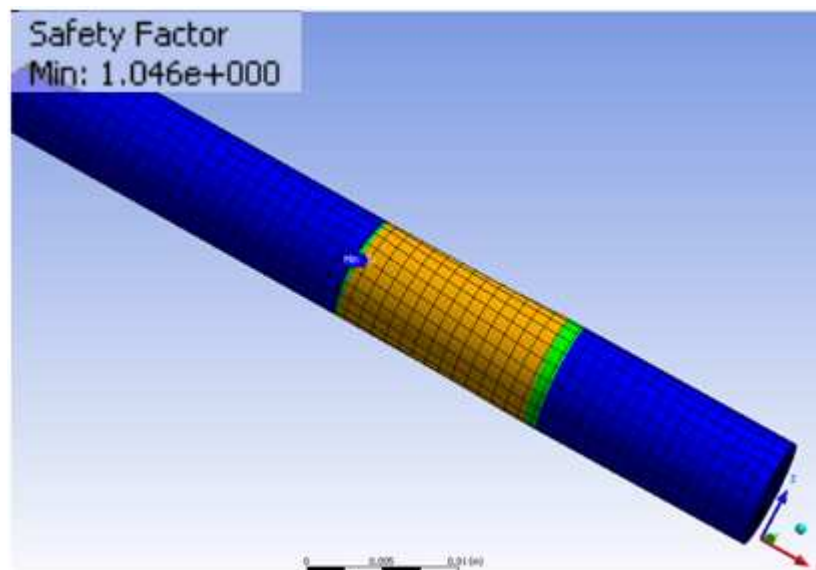
La zona que soporta el esfuerzo más alto en la pieza se muestra en la figura 59. En esa zona el esfuerzo máximo es de $291 \times 10^6 \text{ Pa}$. El eje será de Acero inoxidable 304 con un esfuerzo de fluencia de $304,7 \text{ Mpa}$, lo que demuestra que la pieza resistirá al someterse a las cargas.

Figura 58. Esfuerzo máximo según criterio de Von-mises.



El factor de seguridad se observa en las figura 60.

Figura 59 Factor de seguridad según Von-mises.

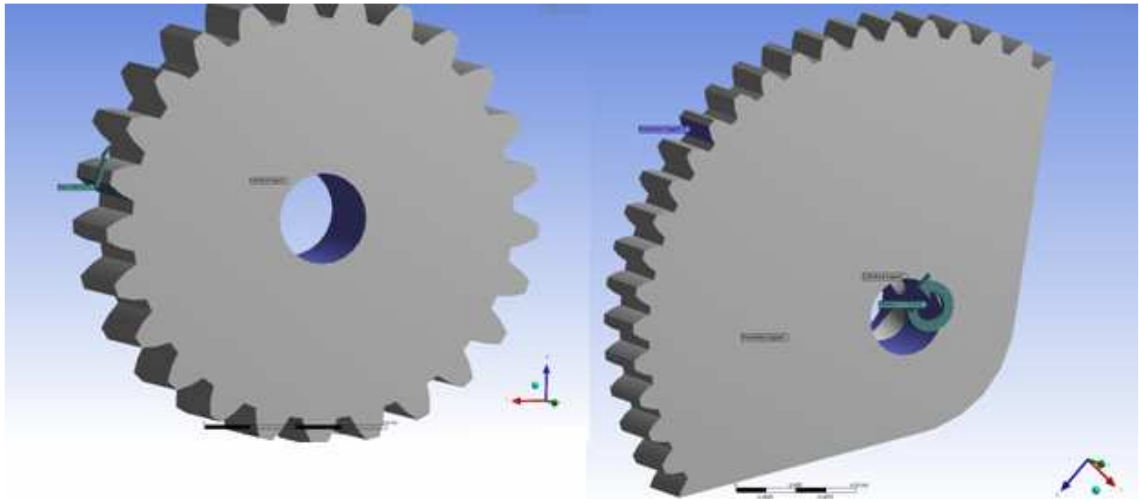


5.3. Análisis virtual de los piñones

Para comprobar la resistencia de los piñones, se identificó el tipo de esfuerzo al que se someterían. Al transmitir la potencia se presenta una carga tangencial en los dientes en contacto. Si se analiza el diente del piñón como una viga en

voladizo se puede decir que la fuerza tangencial intentará flexionar el diente. Esta fuerza a su vez origina un esfuerzo de tensión en un extremo de la raíz del diente y un esfuerzo de compresión en el otro extremo de la raíz. Para conocer el comportamiento del piñón se recurrió al software obteniendo lo siguiente (véase figura 61).

Figura 60. Ambiente de cargas de los piñones

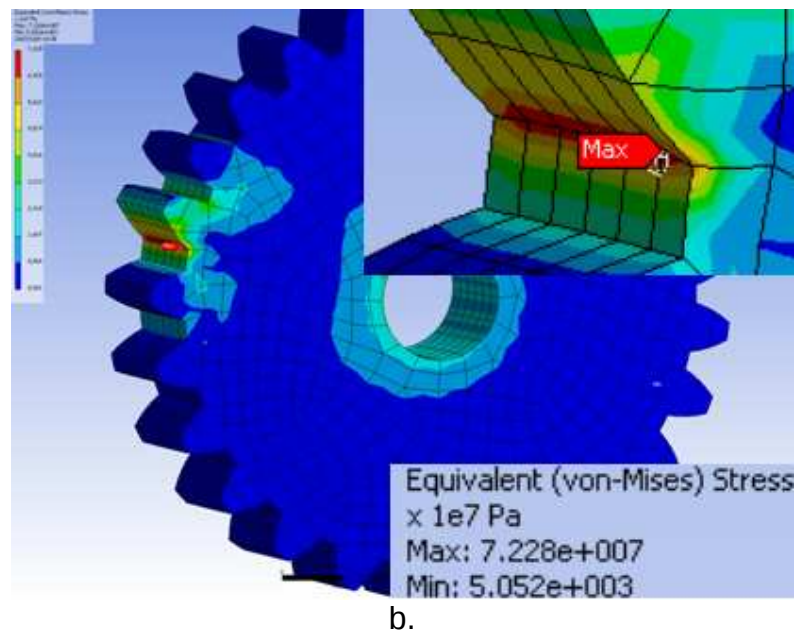
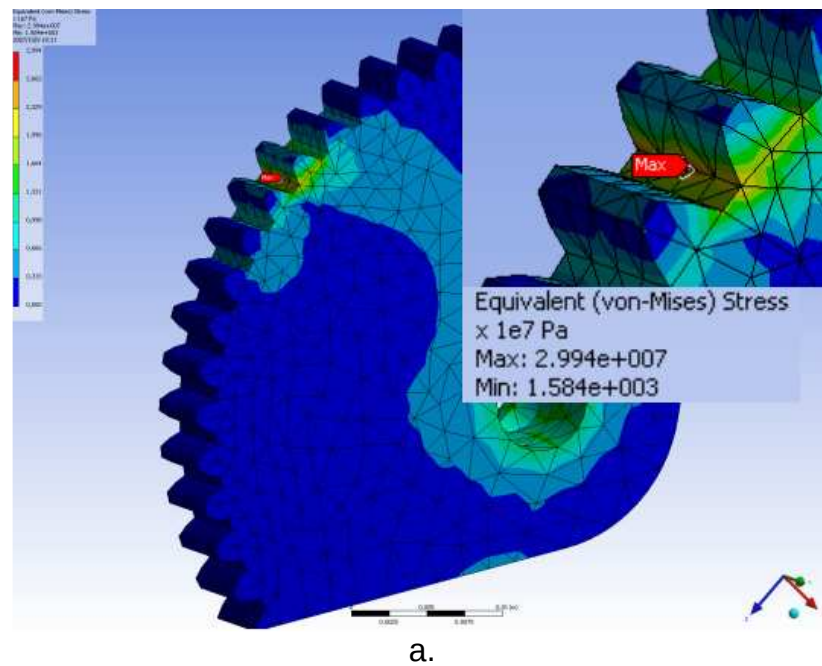


Se plantea una carga en una cara del diente para el piñón grande, un soporte que impide que el piñón tenga movimientos axiales y la torsión en su centro de giro.

En el piñón pequeño se ubica la misma fuerza en una cara del diente y un soporte fijo en su eje que impide que el piñón pueda girar. También se ubica un soporte que impide que el piñón tenga movimientos axiales.

Al realizar la simulación se obtiene el resultado del esfuerzo máximo y factor de seguridad (véase figura 62).

Figura 61. Esfuerzo máximo. a) Piñón grande, b) Piñón pequeño.

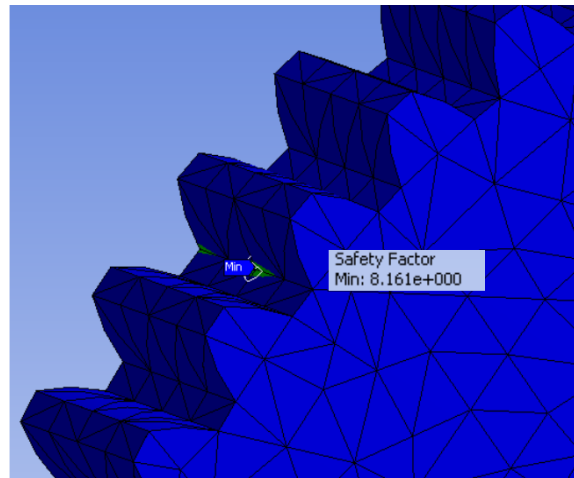


Para un material de Aluminio con 17MPa ⁴ se concluye que los piñones pueden resistir las cargas a las que estarán sometidos.

Se obtienen, según el software, factores de seguridad de 8,16 y 3,87 para el piñón grande y el piñón pequeño respectivamente (véase figura 63).

⁴ HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Tabla de propiedades mecánicas de los materiales, México, Mc. Graw Gill, 2000.

Figura 62. Factor de seguridad. a) Piñón grande, b) Piñón pequeño.



a.



b.

6. PROCESOS DE MANUFACTURA Y OBTENCION DE MATERIALES Y PARTES

A continuación se describirán los procesos de manufactura utilizados para la construcción de cada una de las piezas, así como algunos inconvenientes encontrados en la compra de materiales y construcción. Al finalizar el libro se enunciarán más detalladamente los obstáculos en la fabricación y las conclusiones obtenidas en base a costos, viabilidad de construcción y desempeño del sistema mecánico (pruebas).

6.1. CONSTRUCCION DE LA PINZA, PRIMERA SECCION

Para la fabricación de los perfiles de los dedos y los apoyos se hizo una consulta acerca del proceso de manufactura adecuado para conservar las medidas asignadas en el diseño. Por procesos de manufactura convencionales era grande la posibilidad de obtener un resultado desfavorable en la construcción, así que se concluye, que los procesos de manufactura adecuados para construir los perfiles de la pinza eran el **Maquinado en un Centro de Mecanizado y El Corte Con Láser**.

Al analizar las ventajas de las dos opciones, se puede conocer que la construcción de estos perfiles en un centro de mecanizado resulta más costosa y se necesita un mayor tiempo de construcción. Se estudia entonces la opción de un corte con láser, en donde el maquinado de la lámina de aluminio se realizaría en un tiempo muy corto, trayendo precios más bajos para el corte de los perfiles.

El corte láser es un proceso rápido y silencioso orientado al corte de chapas finas de metal, con un mínimo de pérdida de material y sin distorsiones. Este proceso reproducido por la amplificación de luz estimulada por radiación, permite que las piezas cortadas tengan una alta precisión y que los contornos de las piezas no presenten los defectos característicos de otros procesos, dándole a las partes, las características de piezas propias para ensambles [16].

De acuerdo a la potencia, la máquina está en la capacidad de cortar metales hasta de 20mm de espesor. En la siguiente tabla se relacionan los espesores de los materiales más comunes cortados por la máquina láser usada en WESCO S.A., relacionando sus máximos espesores.

El espesor de la lámina a cortar depende de la reflectividad del material ya que para materiales más reflectivos como el Bronce o el Aluminio con espesores de

lámina mayores a 10mm el láser de la máquina puede devolverse, dañando el cañón del láser.

Como se mencionó en el anterior capítulo, se usará lámina de Aluminio de 3mm de espesor. Observando la tabla de capacidades de corte para la máquina (véase figura 64), se concluye que el espesor asignado al aluminio puede cortarse con ésta equipo.

Figura 63. Tabla de calibres de metales para corte láser.

MATERIAL	CALIBRE
Acero al Carbono	20mm
Acero Inoxidable	12mm
Aluminio	8mm

Tomada de: WESCO S.A. [en línea]: [citado en 2007-08-03]. Disponible en Internet: <<http://www.wesco.com.co/documentos/Wesco-Corte-Laser.pdf>>

La siguiente tarea era buscar una empresa en donde se prestara el servicio de corte láser. En la ciudad de Bucaramanga existen centros de mecanizado pero empresas que presten el servicio de corte con láser no hay. Por tal motivo se hizo una consulta en la ciudad de Bogotá en las empresas que podían prestar este tipo servicio.

- **Obtención de la lámina de aluminio y selección de empresa para corte.**

Después de hacer la consulta en las empresas proveedoras de aluminio de Bucaramanga, se conoce la dificultad de adquirir el material en láminas. Solamente **TODOBRONCES**, una de las empresas consultadas, pudo vender la lámina de aluminio de 3mm. La empresa solicitó el material a su proveedor en Bogotá demorando su adquisición.

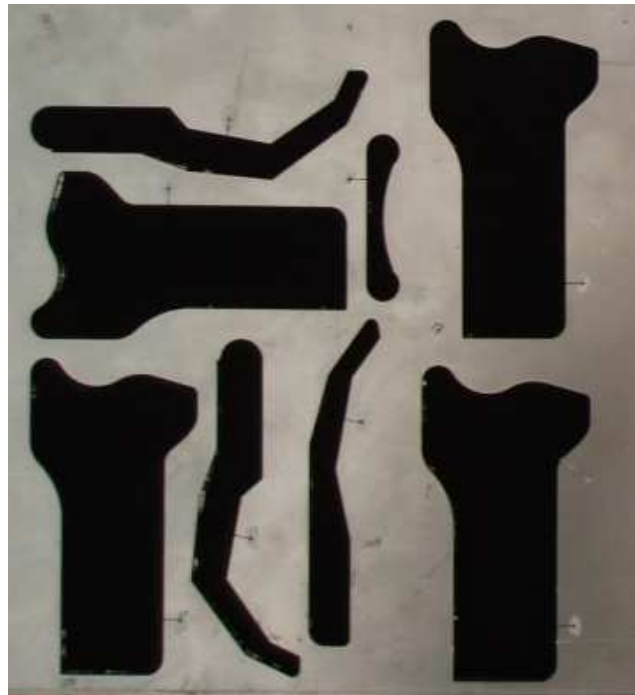
Así mismo, para obtener un buen resultado por parte de la máquina cortadora de láser, se debía enviar el área de la lámina de aluminio según las especificaciones requeridas por la empresa que presta el servicio.

La empresa seleccionada para realizar el corte fue **WESCO S.A.** ubicada en la ciudad de Bogotá. WESCO S.A. solo presta servicios a empresas reconocidas que requieren gran cantidad cortes y cortes especializados, por esta razón, para cortar los cinco perfiles de la pinza, se buscó una empresa que pudiera hacer el contacto. **MAQUINADOS Y MONTAJES**, es una empresa en Bucaramanga que presta servicios de manufactura y es cliente de WESCO S.A. Por medio de esta empresa se pudo enviar el material de aluminio y los planos para el corte de las piezas.

- **Resultado del corte láser**

En la figura 65 se muestra el resultado del corte láser en la lámina de aluminio de 3mm.

Figura 64. Corte de la máquina láser.

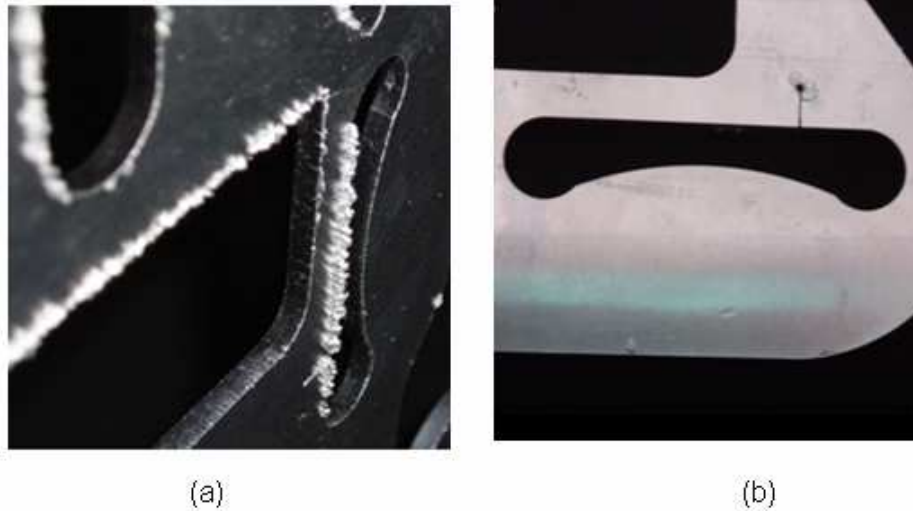


El corte con láser garantiza acabados perfectos para láminas de acero inoxidable y aceros al carbono. Para materiales como el aluminio la máquina tiene que ajustar la potencia del rayo láser debido a su reflectividad, lo que puede ocasionar rebabas en la parte posterior del corte. En la figura 66 a) se observa una parte de la rebaba que ha quedado en la cara posterior de la lámina, la otra parte de rebaba ha quedado en los perfiles cortados.

En la superficie donde se efectúa el corte se puede apreciar el acabado perfecto de los perfiles y el punto en donde la máquina empieza a hacer el corte.

Después de recibir los perfiles, se debió desprender la rebaba con una lima metálica y luego con una lija fina. El corte láser fue, indiscutiblemente, una ayuda para la construcción de la pinza. Aunque se tuvo que acondicionar las piezas después de hecho el corte para mejorar sus bordes posteriores, la construcción de los perfiles fue el proceso que proporcionó más precisión.

Figura 65. (a) Rebaba del corte con láser por la parte posterior de la lámina. (b) Acabado perfecto del perfil y punto de inicio del corte de la máquina.



Una vez retirada la rebaba de los perfiles se puede ver el resultado de las piezas tal y como se habían diseñado (véase figura 67).

Figura 66. Perfiles terminados



- **Construcción de los demás elementos de la primera sección** (véase figura 68).

Tabla 4. Piezas de la primera sección.

	PARTE	PROCESO DE FABRICACION O HERRAMIENTA	TRABAJOS A REALIZAR	MATERIAL
1	Bujes de separación	torno	cilindrado, refrentado y taladrado	Aluminio
2	Cubo de acople	fresadora y machuelos	fresado en las superficies planas del cubo para disminuir dimensiones. Machuelos para roscas	Aluminio
3	Láminas de soporte del servomotor	taladro, tijera cortadora de láminas	para realizar los agujeros en las láminas. Tijera para cortar la forma requerida de lámina	Acero galvanizado calibre 22
4	Buje de apoyo del sinfín de la pinza	fresadora	para realizar los bordes del buje de apoyo del sinfín.	Bronce
5	Tornillo sinfín y corona	fresadora, torno	para realizar piñones y tornillo de gusano	acero y bronce
6	Compensador	fresadora, taladro	para realizar agujeros y delinear contorno	Aluminio
7	Acople rotor	torno, tarrajas	cilindrado, refrentado y taladrado y para roscas externas	Acero inoxidable y bronce
8	Piñones rectos	fresadora, taladro	construcción de dientes	Aluminio
9	Acople del motor de la muñeca	dobladora y taladro	doblar la lámina y construir los agujeros para fijación	Acero galvanizado calibre 22

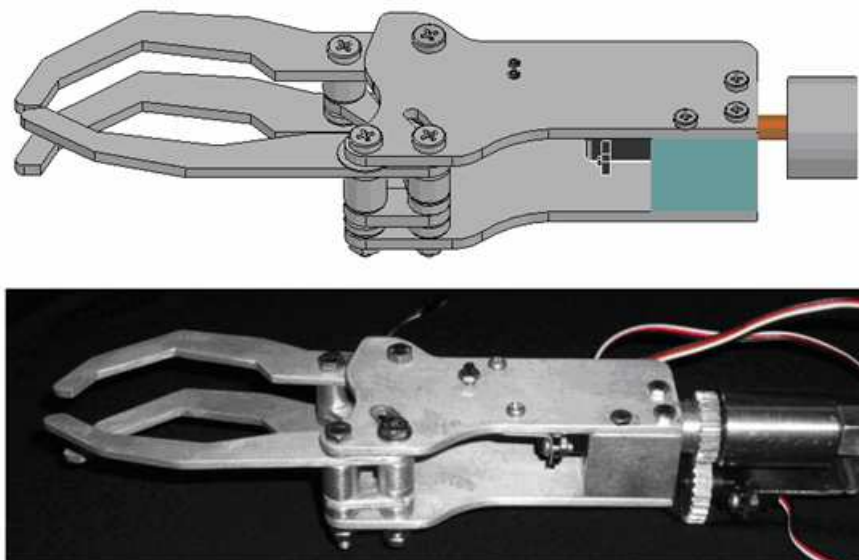
Figura. 67 Piezas de la pinza construidas y servomotor.

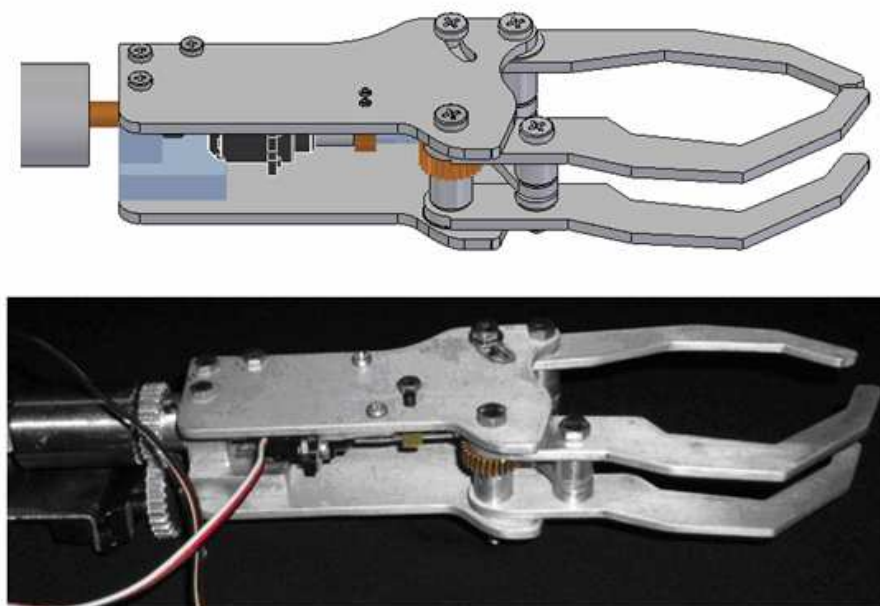


- **Ensamble de la primera sección**

Al ensamblar la pinza se aprecia la facilidad del armado gracias a que todas las partes son desmontables. Se considera conveniente usar para la fijación y/o sujeción de piezas tornillos, tuercas y roscas, porque facilitan el montaje y desarme de todo el sistema, a la vez que garantizan una fuerte sujeción de las partes. En uno de los apoyos se hicieron dos agujeros con taladro para poder sostener las láminas que asegurarán el servomotor (véase figura 69).

Figura 68. Ensamble de primera sección.





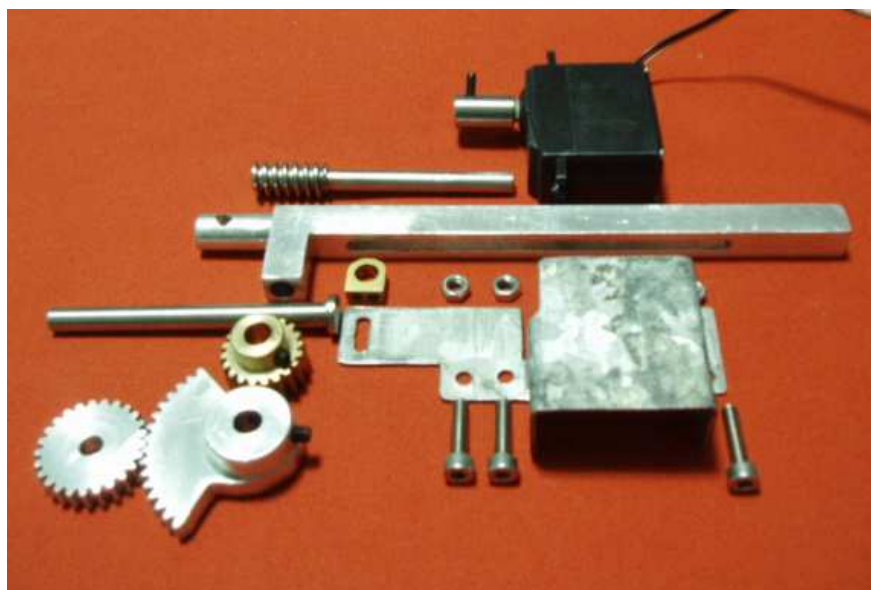
6.2. CONSTRUCCIÓN DE LA SEGUNDA SECCION

En la segunda sección de la prótesis (véase figura 70). se tuvo un inconveniente para construir el soporte de los motores. La adquisición de la platina de aluminio para la construcción del soporte de los motores fue difícil y en el momento del maquinado hubo inconvenientes. El soporte de los motores fue una de las piezas más difíciles de realizar. A continuación se muestra los procesos utilizados para la construcción de la segunda sección.

Tabla 5. Piezas de la segunda sección.

	PARTE	PROCESO DE FABRICACION O HERRAMIENTA	TRABAJOS A REALIZAR	MATERIAL
10	Soporte de los motores	fresadora, torno, taladro, machuelos.	fresado de superficie para eliminar material, construcción de ranura y elaboración de roscas internas.	platina de aluminio
11	Soporte del motor del codo	Dobladora y taladro	doblar la lámina y construir los agujeros para fijación	Acero galvanizado calibre 18

Figura 69. Piezas de la segunda sección construidas y servomotor de elevación del brazo.



6.3. CONSTRUCCIÓN DE LA TERCERA SECCION

La pieza en donde se necesita mayor precisión en la tercera sección era la orquilla (véase figura 71), así mismo fue la que presentó mayor dificultad para maquinarse debido a los ángulos que se necesitaban en ella. La orquilla junto con el pasador (véase figura 73), serían las dos piezas claves para el ascenso del brazo. De igual forma estas dos piezas limitarían el ángulo de giro del brazo a 145° .

Tabla 6. Piezas de la tercera sección.

	PARTE	PROCESO DE FABRICACION O HERRAMIENTA	TRABAJOS A REALIZAR	MATERIAL
12	Tornillo sinfín	Torno	construcción de filetes	Acero inoxidable AISI 304
13	Corona	fresadora, torno, taladro, machuelo	para realizar dientes rosca para tornillo prisionero y refrentado de caras	Bronce

14	Eje principal	Torno	para realizar cilindrado y refrentado	Acero inoxidable AISI 304
15	Piñones rectos	fresadora, torno	para elaboración de dientes y refrentado de caras	Aluminio
16	Orquilla	torno, fresadora	cilindrado, refrentado y fresado de caras	Aluminio
17	Pasador	fresadora, taladro	fresado de caras para conseguir superficies lisas, elaboración de agujeros	Aluminio
18	Bujes de fricción	torno, machuelos, taladro	cilindrado, refrentado y agujeros y roscas	Bronce
19	Tapa de fijación del piñón	Torno	cilindrado, refrentado, agujeros y roscas	Aluminio
20	Gancho	torno, tarraja	para cilindrado, agujeros y rosca.	Aluminio

La tapa de fijación del piñón, en el mecanismo del codo, se fija a la orquilla mediante dos tornillos prisioneros de 3mm de rosca ubicados en la orquilla.

La orquilla y el gancho se hicieron por aparte para luego unirse mediante tornillos (véase figura 71). En el gancho se hicieron dos roscas de 5/32 " y en la orquilla dos agujeros pasantes de la misma dimensión que luego se avellanaron para albergar dos tornillos de 5/32 " de cabeza cónica.

Figura 70. Orquilla y gancho acoplados.



Figura 71. Maquinado del pasador.



Figura 72. . Piezas de la tercera sección terminadas.



6.4. ENSAMBLE DE TODO EL SISTEMA MECANICO

Teniendo la totalidad de las piezas (véase figura 74). y tras haber ensamblado individualmente cada sección, se procede a unir cada una de estas, para completar el montaje de toda la prótesis (véase figura 75).

Figura 73. Totalidad de piezas de la prótesis.

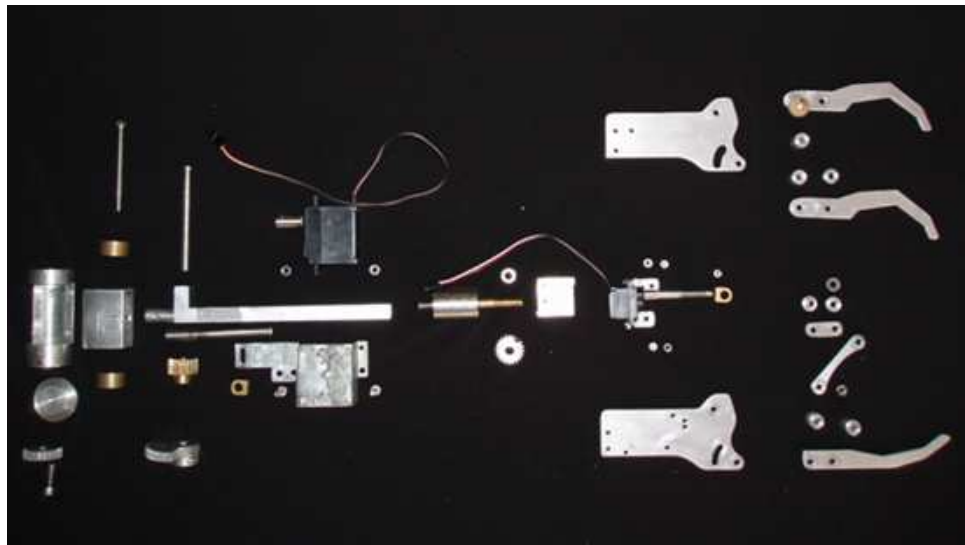
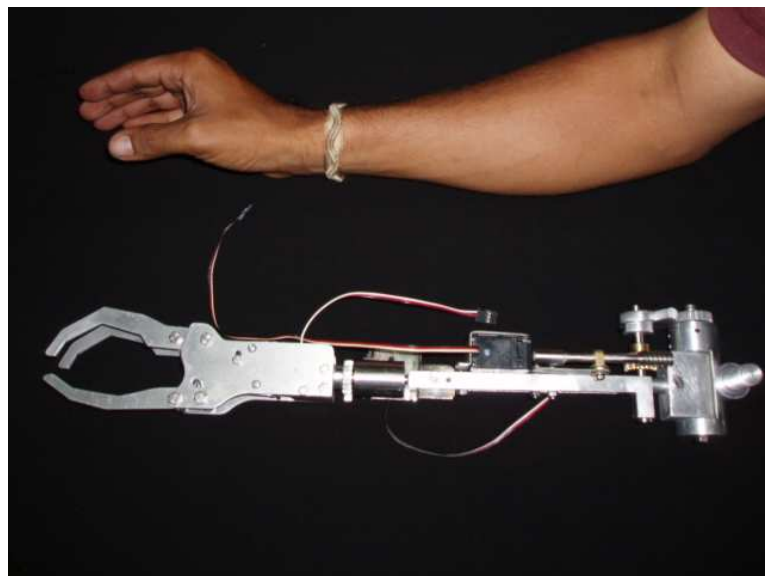


Figura 74. Prótesis completamente armada.



7. PRUEBAS DEL SISTEMA

Para el análisis del comportamiento del sistema mecánico, se optó por hacer una serie de pruebas a cada una de las secciones que componen la prótesis.

7.1. PRUEBA DE APERTURA Y CIERRE DE LA PINZA

La prueba inicial fue para la primera sección (apertura y cierre de la mano). Conociendo el voltaje de trabajo del motor se da inicio al funcionamiento de la pinza. Como se mencionó anteriormente, el motor de la pinza se adecuó para que pudiera dar giros de 360°. Se eliminó también el circuito que permite el funcionamiento del motor como servo lo que permitió que se pudiera energizar directamente con una fuente de voltaje convencional.

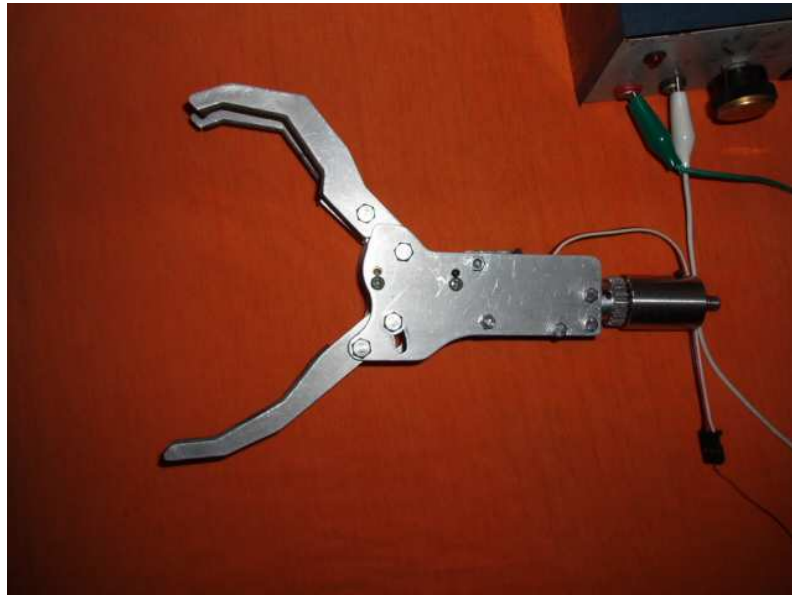
7.1.1. Comportamiento en la apertura

Se energizó el sistema conectado de manera que la pinza iniciara con su apertura, su movimiento fue de manera suave sin ningún tipo de atascamiento. En el sistema de sujeción del motor se notó un leve movimiento que no generó una complicación significativa. El acople que permite la unión del motor con el torillo sinfín no presentó problemas, este era uno de los ensambles delicados de la pinza. Cumplió con las expectativas esperadas ya que no permitió ningún desajuste o desalineamiento. Los bujes cumplieron con la tarea para la cual fueron diseñados, permitiendo de esta manera que los esfuerzos axiales y radiales no afectaran el acople entre el sinfín y la corona, consiguiendo así, un desempeño adecuado del sistema mecánico. En la pinza se contabilizó un tiempo de apertura de 3seg aproximadamente a carga plena.

7.1.2. Comportamiento en el cierre

Se energizó el sistema conectado de manera que la pinza iniciara con el cierre. Todo el sistema mecánico, al igual que en la prueba de apertura, tuvo un desempeño adecuado, sin ningún tipo de complicación en el momento de trabajo. El tiempo de cierre fue de 3seg a 4.8v, comparando con los datos arrojados por los cálculos, se observa la similitud en los valores de tiempo demostrando así su funcionalidad (véase figura 76).

Figura 75. Apertura de la pinza



7.1.3. Prueba de prensado de objetos.

- **Objeto cilíndrico de plástico y 330gr de masa:**

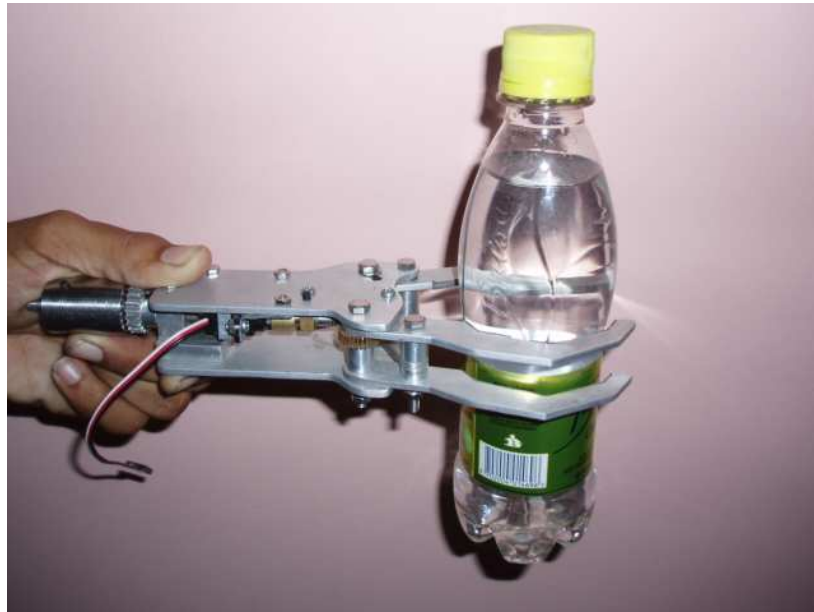
Se tiene la pinza en la posición abierta y se comienza a cerrar para prensar el objeto. En el momento del prensado se observa que el motor se detiene y ocurre un aumento en la corriente. En el momento de contacto con el objeto el motor no entrega el torque necesario para prensarlo. Se intentó comprobar la sujeción del cilindro levantando la pinza, pero se observó que éste se deslizaba en los dedos.

Al aumentarse la corriente en el motor, se reduce el voltaje, aspecto que impide que el motor entregue el torque especificado por el fabricante. Al disminuirse el voltaje se disminuye el torque necesario para el prensado impidiendo el trabajo de sujeción de los dedos.

Por seguridad, el motor se desenergiza, y luego, se consigue que se prensen los objetos (véase figura 77). Alimentando el motor mediante pulsos. Cada pulso asignado inicia con el voltaje necesario para alcanzar el torque de prensado. Igualmente se tiene en cuenta que el voltaje efectivo es por un corto instante de tiempo. Por esta razón es necesario asignar varios pulsos para conseguir que el motor pueda girar un cierto ángulo para prensar el objeto.

Después de asignar los pulsos necesarios se observa que la pinza sujeta firmemente el cilindro, se levanta la pinza y se sostiene con seguridad el objeto de 330gr.

Figura 76. Prensado de objeto de 330gr.



- **Objeto cilíndrico de plástico y 420gr de masa:**

De igual forma, se inicia el prensado de un objeto de 420gr de masa con forma cilíndrica, pero de un radio más grande. Se repite el procedimiento para el prensado y se observa nuevamente que el motor se detiene al contacto con el objeto. Se hace la misma rutina del primer objeto y se consigue la sujeción firme del objeto. Se levanta la pinza y se comprueba que la pinza puede prensar los 420gr.

Sin embargo en esta prueba ocurre una falla en el motor. Al seguir asignándole pulsos al motor después de un periodo de pruebas se notó que los engranes internos patinaban unos sobre otros produciendo un ruido diferente al del motor en operación normal. Para un objeto de mayor masa se debía asignar más pulsos.

- **Objeto cilíndrico de plástico y 500gr de masa:**

En este momento se comprobaría el torque del motor seleccionado para el prensado de un objeto cilíndrico de 500gr (véase figura 78). Se realizó el

mismo procedimiento y se observó que el motor sujetaba firmemente el cilindro. Se levantó la pinza y se comprobó la adecuada sujeción del objeto.

Figura 77. Prensado de un objeto de 500 gr.



7.2. PRUEBA DE GIRO DE LA MUÑECA (PRONACIÓN Y SUPINACION)

Se preparó el sistema para esta prueba. En este momento era necesaria una fuente de voltaje y un variador de frecuencia ya que el motor para el giro de la muñeca se conservó como servo, y no se podía polarizar directamente.

Teniendo el sistema electrónico necesario para el servomotor y energizándolo, se observó que el mecanismo ideado para este movimiento funcionó correctamente. Al trabajar con el servomotor no fue necesario realizar un tope mecánico en el mecanismo ya que este servomotor puede girar un ángulo de 180°, ángulo de giro que fue asignado al movimiento de prono-supinación. El mecanismo y el movimiento de la muñeca cumplieron con las expectativas.

- **Giro con el objeto de 500gr de masa**

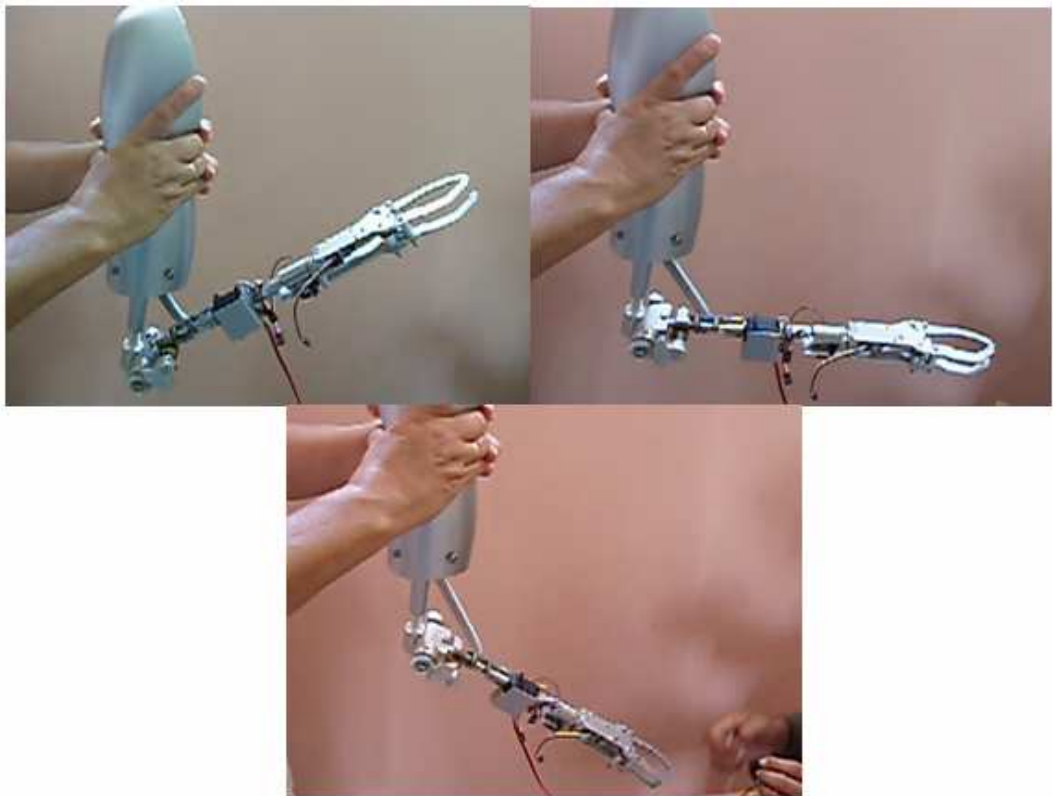
Al probar el funcionamiento del mecanismo con el objeto de 500gr de masa se puede observar un adecuado desempeño. El servomotor junto con el mecanismo producen un movimiento suave y controlado. Esta sección de la prótesis no exige valores altos de torque por lo tanto, lo primordial a tener en cuenta es el control del movimiento.

7.3. PRUEBA DE MOVIMIENTO DE ELEVACION DEL CODO

Al realizar la prueba de ascenso (véase figura 79), se notó un atascamiento en la transmisión sinfín-corona. Al energizar el motor se observa que no se produce el ascenso del brazo. El mecanismo señalado es el que impide que el brazo pueda ascender o descender por fuerzas externas a las del motor, manteniendo un bloqueo en el momento del acople. Al analizar la causa del atascamiento, se puede concluir que la disposición del mecanismo autobloqueante en el sistema mecánico contribuye a un contacto permanente entre los hilos del sinfín y los dientes de la corona, pero con una presión entre ellos considerable y permanente provocada por el peso del brazo.

Para disminuir la presión de contacto en la transmisión se necesitaba una fuerza que se opusiera al peso del brazo, esta a su vez disminuiría la presión de contacto de los dientes y los esfuerzos adicionales para el motor y la transmisión. Para conseguir esto se concluyó que era conveniente adaptar un elemento flexible. Con este elemento se podría conseguir un movimiento más suave en la transmisión y una entrega más eficiente de la potencia del motor. Una vez adaptado el resorte. Se procede a energizar el motor. Se puede observar el ascenso y descenso del brazo.

Figura 78. Movimiento del codo.



- **Elevación del objeto de 500gr**

Al prensar el objeto con la pinza y proceder a elevar el brazo, se observa que el motor no entrega un torque necesario para la elevación. Al realizar las pruebas de cada sección, sin el objeto, se aprecia que los mecanismos entregan el movimiento deseado.

En el caso del mecanismo del codo se observó un buen desempeño sin el peso a sostener, lo que indica la funcionalidad del mecanismo. Para el ascenso del brazo con el objeto, con este tipo de mecanismo autobloqueante y con la disposición propuesta, se puede concluir que es necesario aumentar el factor de seguridad para la selección del motor, con el fin de lograr el objetivo propuesto.

8. ANALISIS DE COSTOS

En la tabla 7 se mostrará el costo correspondiente a la fabricación de los elementos de la prótesis y de adquisición de los motores.

Tabla 7 Costos de manufactura y de partes de la prótesis.

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	MATERIAL	COSTO
1	CORTE DE PERFILES DE LA PINZA Y LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 3mm	1	ALUMINIO	\$ 180.000
2	MAQUINADO DE BUJES DE SEPARACION DE DEDOS	8	ALUMINIO	\$ 24.000
3	MAQUINADO DE BUJES DE APOYO DEL SINFÍN-PINZA	2	BRONCE	\$ 20.000
4	MAQUINADO DE CORONA Y TORNILLO SINFÍN-PINZA	1	BRONCE Y ACERO	\$ 70.000
5	TORNILLOS MILIMETRICOS M3 Hex	7	ACERO INOX	\$ 1.500
6	TORNILLOS MILIMETRICOS M4 Hex Y TUERCAS	9	ACERO INOX	\$ 3.000
7	TORNILLOS Y PRISIONEROS DE ROSCA MILIMETRICA M3, M4 Y 5/16"	11	ACERO	\$ 4.000
8	MAQUINADO CUBO DE ACOUPLE	1	ALUMINIO	\$ 30.000
9	MAQUINADO ACOUPLE SINFÍN-SERVOMOTOR	1	BRONCE	\$ 5.000
10	MAQUINADO ROTOR	1	ACERO INOX	\$ 20.000
11	MAQUINADO DE ACOUPLE DE ROTOR	1	ACERO INOX	\$ 10.000
12	MAQUINADO DEL TORNILLO ROTOR DE LA PINZA	1	BRONCE	\$ 10.000
13	MAQUINADO DEL ROTOR	1	ACERO INOX	\$ 20.000
14	MAQUINADO DE SOPORTE DE LOS MOTORES	1	ALUMINIO	\$ 70.000
15	MAQUINADO DEL SOPORTE DEL MOTOR DEL CODO	1	ACERO GALV	\$ 17.000
16	MAQUINADO DE PASADOR Y ORQUILLA	1	ALUMINIO	\$ 90.000
17	FABRICACION DE BUJES Y TAPA DE FIJACION DEL PIÑON EN ORQUILLA	3	BRONCE Y ALUMINIO	\$ 12.000
18	MAQUINADO DE PIÑONES DE MUÑECA Y CODO	4	ALUMINIO	\$ 150.000
19	FABRICACION DE SINFÍN Y CORONA DEL CODO	1	ACERO Y BRONCE	\$ 70.000

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	MATERIAL	COSTO
20	MAQUINADO DE ACOPLE SINFÍN CODO-SERVOMOTOR	1	ACERO INOX	\$ 15.000
21	MAQUINADO DE BUJES DE APOYO DEL SINFÍN-CODO	2	BRONCE	\$ 10.000
22	MAQUINADO DE SOPORTE DEL MOTOR DE LA MUÑECA	1	ACERO GALV	\$ 15.000
23	MAQUINADO DEL EJE PRINCIPAL DE LA PROTESIS	1	ACERO INOX	\$ 10.000
24	MAQUINADO DEL GANCHO	1	ALUMINIO	\$ 35.000
25	SERVOMOTOR FUTABA S3107	3		\$ 210.000
26	SERVOMOTR PARALLAX	1		\$ 35.000
27	SERVOMOTR FUTABA S9206	1		\$ 220.000
28	VASTAGO DE ACOPLE GANCHO-BRAZO	1	ACERO	\$ 15.000
29	BRAZO DE FIBRA DE ACRILICO	1	FIBRA DE ACRILICO	\$ 10.000
			TOTAL	\$ 1.381.500

- Comparando el costo de la prótesis realizada con el de una prótesis mecánica existente en el mercado, se puede notar una amplia diferencia. La prótesis que se ha elaborado en el proyecto arroja un monto de \$1.381.500 pesos, en cambio el costo de una prótesis mecánica en el mercado (en Colombia) oscila entre 4 y 10 millones de pesos. Una prótesis mioeléctrica para antebrazo y con un solo movimiento que corresponde a la apertura y cierre de la pinza se puede encontrar en Colombia en \$38.000.000 de pesos o más dependiendo de las funciones. Es una clara muestra de lo que se ha conseguido en la realización del trabajo al buscar la reducción de costos y tres graos de libertad.

CONCLUSIONES

En base a los resultados de las pruebas de movimientos de la pinza es claro observar el adecuado comportamiento del mecanismo. Este aspecto indica que los diseños conceptual y detallado de la primera sección fueron eficientes. Por otra parte, la apariencia de la pinza no limitó el buen desempeño del mecanismo, consiguiéndose así una buena relación entre estética y funcionalidad.

Al determinar la forma final de la pinza se procedió a asignar los materiales adecuados. El aluminio permitió conservar un valor bajo del peso, al mismo tiempo que se mantenían las dimensiones asignadas a los elementos. Para el espesor asignado a las piezas, el aluminio mostró una adecuada consistencia. Este material contribuyó también a la buena apariencia de la pinza.

Para garantizar un adecuado desempeño de la primera sección es importante tener en cuenta el proceso de fabricación. Para la elaboración de la pinza se concluye que el método de fabricación conveniente es el de corte con láser, ya que permite mantener las dimensiones originales del diseño contribuyendo a que las piezas encajen perfectamente. Esta condición de precisión a su vez permite que las fuerzas y ángulos calculados en la pinza se conserven para de este modo conseguir una eficiente funcionalidad. De igual forma, es el proceso de fabricación más económico para este tipo de mecanizados.

Es preciso mencionar que en la primera sección de la prótesis se presentó una falla, ocasionada por el trabajo realizado del servomotor. Este servomotor muestra falla en el momento de encontrar obstáculo por el objeto de trabajo, es ahí donde el consumo de corriente aumenta y el voltaje necesario para alcanzar el torque requerido de trabajo es insuficiente; esto, conlleva a un mal desempeño en el momento de transmitir potencia.

Recomendaciones para una buena operación del servomotor:

- En el momento de la operación del servomotor, es conveniente realizar un circuito apropiado que permita drenar el exceso de corriente que se presenta, de tal manera que el voltaje requerido para conseguir el torque esperado, sea el apropiado.
- Es conveniente conseguir servomotores que presenten piñonería metálica y no plástica, para que su vida útil en la prótesis sea mayor.
- Seleccionar un motor de mayor torque.

En la segunda sección de la prótesis que corresponde a la muñeca, es posible decir que el desempeño del mecanismo de acople y rotación fue satisfactorio. Es un mecanismo sencillo que posee un servomotor el cual permite controlar el movimiento según la programación establecida. Se puede concluir que el mecanismo usado es eficiente y recomendable. Durante el movimiento de rotación no se necesita vencer un torque considerable. La pequeña cantidad de piezas del diseño permite un sistema más sencillo y eficiente.

La tercera sección de la prótesis es la sección de mayor complejidad dentro de toda la estructura, si se analiza en torno a los esfuerzos.

Las piezas de mayor importancia que comprenden la tercera sección son el eje principal de la prótesis, la varilla de soporte de los motores, los piñones de transmisión y el sistema pasador-orquilla. Cada uno de estos elementos fue elaborado con materiales cuidadosamente seleccionados, alcanzando así la resistencia a los esfuerzos requerida para evitar deformaciones inesperadas que impidieran un óptimo desempeño del mecanismo en la elevación del brazo.

En cuanto a la funcionalidad del mecanismo, se observó una leve deficiencia en su desempeño, un pequeño atascamiento se presenta en esta sección impidiendo que este se eleve fácilmente. Este atascamiento se presenta en la unión del sinfín y la corona debido al mismo peso de la estructura. Así mismo, el motor seleccionado comienza a presentar un problema similar al que anteriormente se mencionó en el sistema de la pinza.

Para esta leve falla es necesario adaptar un sistema elástico que proporcione una fuerza inversa a la generada por el peso de la prótesis, permitiendo eliminar el atascamiento en la transmisión del sistema de elevación, consiguiendo la movilidad de la prótesis.

El anterior análisis fue basado en pruebas hechas sin el peso adicional que proporcionaría el objeto que se fuera a levantar.

En la prueba de ascenso del objeto, el comportamiento es similar al del primer análisis. Cabe aclarar que fue haciendo uso del sistema elástico, es decir que el desempeño es aun más crítico, ya que a pesar de usar el sistema que proporciona la fuerza inversa al peso de la prótesis, no se logra levantar el objeto.

Para solucionar este problema es preciso tener en cuenta las siguientes recomendaciones.

- Cambiar el motor, elevar el factor de seguridad de desempeño de motor para conseguir uno de mayor torque que pueda proporcionar una mayor potencia en la transmisión y de esta manera conseguir una segura elevación del sistema protésico.
- Disponer de un elemento elástico de más, para aumentar la efectividad en el desempeño de la prótesis.
- Analizar otro tipo de mecanismo de elevación más sencillo que proporcione una transmisión de la fuerza de elevación de forma simétrica. Al tener simetría en la transmisión se evitarán problemas de balanceo en el eje principal de la prótesis y por ende en el soporte de los motores, impidiendo un posible desajuste de los piñones rectos del codo.

El inconveniente de una transmisión autobloqueante en el codo es la compresión excesiva en los dientes de la corona y los filetes del sinfín. Se recomienda analizar la posibilidad de incorporar un motor que permita el ascenso y bloqueo del brazo sin usar transmisiones autobloqueantes, sino, que con su propio torque se pueda detener la rotación del brazo en el estado de reposo. De esta forma se podrían eliminar cargas combinadas y esfuerzos considerables en una sola pieza.

Los procesos de fabricación usados para la construcción de los elementos de la segunda y tercera sección no son los que brindan mayor precisión. Para una adecuada presentación y para un eficiente comportamiento del sistema mecánico es recomendable analizar otros procesos de manufactura como el control numérico computarizado CNC. En este proceso se minimizan los errores por fabricación en las piezas, permitiendo mantener las características originales del diseño.

Las simulaciones aplicadas a las piezas que soportaban mayores esfuerzos, a manera de comparación, arrojaron datos satisfactorios que garantizaron la resistencia de las piezas del sistema. Para un diseño posterior es práctico el uso de un software de elementos finitos, ya que arrojará resultados acerca del comportamiento del sistema con mayor precisión. En general, el sistema mecánico se comportó de una manera aceptable, consiguiendo la movilidad de las tres secciones que corresponden a la prótesis, y, a su vez, a los tres grados de libertad propuestos en los objetivos del proyecto.

La investigación realizada es una base fundamental para las personas interesadas en el tema. Así mismo, se insta a la facultad de ingeniería mecánica a continuar con la investigación y el trabajo en este campo, con el objetivo de obtener en conjunto avances importantes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] VERIMED HEALTHCARE NETWORK. Definición de prótesis [en línea]. shands health care, © 1998 – 2007 [citado en 2007-02-01]. Disponible en internet: <http://shands.org/health/spanish/esp_ency/article/002286.htm>.
- [2] J.M. Dorador González, P.A. Ríos Murillo, R.I. Flores Luna (et al.). Simposio: la investigación en la facultad de ingeniería (UNAM), Diseño de Prótesis Inteligentes, Prótesis mioeléctrica [en línea], 2004 [citado en 2007-02-01]. Disponible en Internet: <http://www.fi-p.unam.mx/simposio_investigacion2dic04/disenio_protesis_extenso.html>.
- [3] NORTON, ROBERT L. Diseño de maquinaria, Capítulo 2, página 24-33, México, Mc. Graw Gill, 2000.
- [4] HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Capítulo 14, página 615-618, México, Mc. Graw Gill, 2000.
- [5] HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Capítulo 11, página 424, 425, México, Mc. Graw Gill, 2000.
- [6] SCAMECANICA, Engranés cilíndricos rectos [en línea], [citado en 2007-02-02]. Disponible en Internet: <http://www.scamecanica.com/es/metal/Fotos_Mec/CilRecto.jpg>.
- [7] SCAMECANICA, Engranés cilíndricos helicoidales [en línea], [citado en 2007-02-02]. Disponible en Internet: <http://www.scamecanica.com/es/metal/Fotos_Mec/CilHeli.jpg>.
- [8] WIKIPEDIA, Definición de servomotor [en línea], [citado en 2007-03-03]. Actualizado continuamente. Disponible en Internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Servomotor>>.
- [9] HAMROCK, Bernard J. Elementos de máquinas, Capítulo 15, página 679, 694, 701, 709, México, Mc. Graw Gill, 2000.

[10] Piován Marcelo Tulio, Proyecto de elementos de acoplamiento, Descripción y selección de acoplamientos, Acoplamientos Rígidos de Manguito con Prisionero, Capítulo 8 [en línea]. Versión 2004, [citado en 2007-03-05]. Pdf. Disponible en internet: <<http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/elementosdemaquinas/cap08-02.pdf>>

[11] PAULSTRA, Acoplamientos Flexibles [en línea]. Google, s.f. Pdf. Disponible en Internet: <<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2649/3/34593-3.pdf>>

[12] Cojinetes [en línea]. Google s.f. Disponible en Internet: <<http://motor.terra.es/motor/servicio/definicion.cfm?id=183>>

[13] PAULSTRA, Cojinete de Deslizamiento [en línea]. s.f. Pdf. Disponible en Internet: <<http://www.fi.uba.ar/materias/6712M/CojDeDeslTeorico.pdf>>

[14] LÓPEZ BELTRÁN ROYMAN, TORRES S. JAIME, Metodología mixta de selección de materiales aplicada en la escogencia del material para un dedo de pinza de sujeción de un manipulador industrial [en línea]. Google [citado en 2007/06/02]. Página 4. Pdf. Disponible en Internet: <ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/12/metodologia_mixta_de_seleccion_de_materiales.pdf>. También disponible en versión HTML: http://64.233.169.104/search?q=cache:TwKbEHY6lRQJ:ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/12/metodologia_mixta_de_seleccion_de_materiales.pdf+Este+tipo+de+agarre+consiste+en+sujetar+un+objeto+hasta+que+no+se+pueda+mover&hl=es&ct=clnk&cd=2&gl=co

[15] WESCO S.A., Corte Láser [en línea]. [citado en 2007-08-03]. Pdf. Disponible en Internet: <<http://www.wesco.com.co/documentos/Wesco-Corte-Laser.pdf>>

[16] WORDREFERENCE, Diccionario de la lengua española, Definición de “pronación” [en línea]: [citado en 2007-12-10]. Disponible en Internet: <http://www.wordreference.com/definicion/pronaci%F3n>

[17] WIKIPEDIA, Definición de “supinación” [en línea]: actualizado el 10:21, 6 dic 2007, [citado en 2007-12-10] Disponible en Internet <http://es.wikipedia.org/wiki/Supinaci%C3%B3n>