



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

AUTOR: MENA GUEVARA JOSÉ GABRIEL

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN
BRAZO ROBÓTICO CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD, APLICANDO
INGENIERÍA INVERSA PARA LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS “ESPE” EXTENSIÓN LATACUNGA.**

DIRECTOR: ING. DAVID R. RIVAS L.

CODIRECTOR: ING. FÉLIX J. MANJARRÉS A.

Latacunga, agosto 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA****CERTIFICACIÓN**

ING. DAVID R. RIVAS L. (DIRECTOR)

ING. FÉLIX J. MANJARRÉS A. (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado **“Diseño y construcción de la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa para la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.”** realizado por el señor: JOSÉ GABRIEL MENA GUEVARA; ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Latacunga, Agosto del 2014.

ING. DAVID R. RIVAS L.

DIRECTOR

ING. FELIX J. MANJARRÉS A.

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo,

JOSÉ GABRIEL MENA GUEVARA

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado **“Diseño y construcción de la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa para la universidad de las fuerzas armadas “ESPE” extensión Latacunga”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan manteniendo normas APA; y, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Agosto del 2014.

JOSÉ GABRIEL MENA GUEVARA

CC: 050285802-0

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo,

JOSÉ GABRIEL MENA GUEVARA

Autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“Diseño y construcción de la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa para la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Agosto del 2014.

JOSÉ GABRIEL MENA GUEVARA

CC: 050285802-0

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Satanás pues reconozco su poder y astucia; el contempla al mundo y lo hace seductor, fiestas y bailes que atraen como imán a mi corazón, nada más digno en este plano he encontrado que poder medir mi voluntad en su titánico legado. Sin entenderlo solo aspiro a ser un simio bien entrenado.

.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la creación porque desde la más pequeña vibración de materia hasta aquella grandeza que los hombres llaman Dios, ya sea en un compañero de vida, una co-creadora de universos, una artista doméstica, un hermano en la verdad, en la magia creadora de siete notas, en el silencio de una dulce dama o en las páginas perdidas del sabio que escribe mi historia me enseñó que la mayor fuerza proviene de un corazón amable, nada resulta más sabio que admitir la ignorancia y nada es más mundano que la lógica.

Porque ya sea por trepa del destino, voluntad divina o casual descuido son camaradas en mi camino.

GRACIAS

Me he dado cuenta que soy el hombre más poderoso de la tierra. Sin embargo, no estoy seguro de que hacer a continuación. Ya se me ocurrirá algo.

Moon-Watcher

ÍNDICE GENERAL

| | |
|----------------------------------------------|-------|
| PORTADA | i |
| CERTIFICACIÓN..... | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | iii |
| AUTORIZACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| RESUMEN..... | xxii |
| ABSTRACT..... | xxiii |
| PRESENTACIÓN | xxiv |
| CAPÍTULO I | |
| FUNDAMENTO TEÓRICO | 1 |
| 1.1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.3. OBJETIVOS | 2 |
| 1.4. ALCANCE..... | 3 |
| 1.5. ESTADO DE LA CIENCIA..... | 3 |
| 1.5.1. Introducción a la Robótica | 3 |
| 1.5.2. Robótica Industrial..... | 4 |
| 1.6. MECÁNICA DEL ROBOT | 5 |
| 1.6.1. Materiales | 5 |
| 1.6.2. Anatomía del robot | 6 |
| 1.6.3. Cinemática del Robot Manipulador..... | 7 |
| 1.7. MECÁNICA DEL ROBOT CRUSTCRAWLER..... | 9 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8. INGENIERÍA INVERSA, MORFOGÉNESIS E INGENIERÍA CONCURRENTE..... | 12 |
| 1.9. DESARROLLO DE FUNCIÓN DE CALIDAD | 13 |
| 1.9.1. Las cuatro fases | 13 |
| 1.9.2. La casa de calidad..... | 14 |
| a) Voz del usuario | 15 |
| b) Análisis de la competencia | 16 |
| c) La voz del ingeniero | 17 |
| d) Correlaciones | 17 |
| e) Evaluación técnica..... | 17 |
| f) Compromisos técnicos | 18 |
| 1.9.3. Módulo e interfaces | 20 |
| 1.10. SOFTWARE CAE..... | 22 |
| CAPÍTULO II | |
| METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 25 |
| 2.1. MODELADO DE PIEZAS. | 25 |
| 2.1.1. Modelado de la piezas a utilizarse en el servo motor DYNAMIXEL MX 106T. | 27 |
| a) Articulación..... | 27 |
| b) Adaptador de placa doble..... | 30 |
| c) Adaptador de placa simple | 33 |
| d) Viga de 127mm | 34 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| e) Bases para servo motores..... | 36 |
| f) Mesa giratoria..... | 38 |
| g) Disco de 113mm..... | 41 |
| 2.1.2. Modelado de la piezas a utilizarse en el servo motor DYNAMIXEL MX-64T | 42 |
| a) Articulaciones..... | 42 |
| b) Viga de 63.5mm | 44 |
| c) Adaptador tipo L | 45 |
| 2.1.3. Modelado de la piezas a utilizarse en el servo motor DYNAMIXEL MX-28T | 47 |
| a) Articulación para pinza | 47 |
| b) Base para servo motor reducida..... | 50 |
| c) Pinzas..... | 51 |
| 2.2. MORFOGENÉISIS | 53 |
| 2.2.1. Adaptador de placa simple | 54 |
| 2.2.2. Adaptador de placa doble..... | 55 |
| 2.2.3. Viga de 127mm | 56 |
| 2.2.4. Viga de 63.5mm | 57 |
| 2.2.5. Adaptador tipo L | 58 |
| 2.2.6. Articulación para pinza | 59 |
| 2.2.7. Articulaciones | 60 |
| 2.2.8. Bases para servo motor | 61 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3. CINEMÁTICA DEL ROBOT..... | 62 |
| 2.3.1. Peso de los elementos | 64 |
| 2.3.2. Ángulos de giro..... | 65 |
| 2.3.3. Modelado cinemático..... | 68 |
| 2.4. PLANIFICACIÓN DEL PRODUCTO..... | 70 |
| 2.4.1. Casa de calidad..... | 71 |
| 2.4.2. Análisis de competencias | 72 |
| . Elaborado por Mena, J..... | 72 |
| 2.4.3. Análisis funcional..... | 72 |
| CAPÍTULO III | |
| DISEÑO Y DESARROLLO | 76 |
| 3.1. ANÁLISIS GENERAL PARA MODIFICAR EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER..... | 76 |
| 3.2. REDUCCIÓN DE MASAS DE LAS PIEZAS DE LA ESTRUCTURA PARA EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER | 76 |
| 3.2.1. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 106T. | 77 |
| a) Articulación..... | 77 |
| b) Adaptador de placa doble..... | 78 |
| c) Adaptador de placa simple..... | 79 |
| d) Viga de 127mm | 80 |
| e) Base para servo motor | 81 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| f) Mesa giratoria y disco de 113mm..... | 81 |
| 3.2.2. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 64T. | 82 |
| a) Viga de 63.5mm | 82 |
| b) Adaptador tipo L | 83 |
| 3.2.3. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 28T. | 84 |
| a) Articulaciones para pinza | 84 |
| b) Pinzas..... | 85 |
| 3.3. MODIFICACIÓN DE PIEZAS A USARSE EN EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER | 86 |
| 3.3.1. Incremento de dimensiones de las piezas de la estructura del brazo robótico CrustCrawler. | 87 |
| a) Base para servo motores reducida | 87 |
| b) Pinza | 88 |
| 3.4. VALIDACIÓN DE PIEZAS A USARSE EN EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER. | 89 |
| 3.4.1. Selección de material | 89 |
| 3.4.2. Estudio estático | 90 |
| 3.4.3. Estudio cinemático | 91 |
| CAPÍTULO IV | |
| IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL BRAZO ROBÓTICO | 93 |
| 4.1. GENERACIÓN DE PLANOS | 93 |
| 4.2. CONSTRUCCIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO | 95 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO | 96 |
| 4.4. PRUEBAS FINALES | 100 |
| 4.4.1. Mejoras de rendimiento para la estructura del brazo robótico..... | 100 |
| 4.4.2. Mejoras cinemáticas para la estructura del brazo robótico..... | 103 |
| 4.4.3. Análisis de las especificaciones técnicas | 104 |
| 4.5. APROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS | 106 |
| CAPÍTULO V | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 108 |
| 5.1. CONCLUSIONES..... | 108 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 109 |
| BIBLIOGRAFÍA: | 110 |
| NETGRAFÍA: | 111 |
| GLOSARIO | 112 |
| ANEXOS..... | 115 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1. | Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-28T..... | 10 |
| Tabla 1.2. | Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-64T..... | 11 |
| Tabla 1.3. | Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-106T..... | 11 |
| Tabla 2.1. | Valores de masa para cada Pieza del Brazo Robótico CrustCrawler..... | 54 |
| Tabla 2.2. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador de Placa Simple. | 55 |
| Tabla 2.3. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador de Placa Doble | 56 |
| Tabla 2.4. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para la Viga de 127mm..... | 57 |
| Tabla 2.5. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para la Viga de 63.5mm..... | 58 |
| Tabla 2.6. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador Tipo L. | 59 |
| Tabla 2.7. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Articulación para Pinza. | 60 |
| Tabla 2.8. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Articulación. | 61 |
| Tabla 2.9. | Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Bases para Servo Motor..... | 62 |
| Tabla 2.10. | Tabla D&H del Brazo Robótico Crustcrawler. | 64 |
| Tabla 2.11. | Componentes y peso de cada elemento del brazo Robótico CrustCrawler. | 65 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 2.12. Fuerza, masa y rendimiento por segmentos del brazo robótico CrustCrawler..... | 68 |
| Tabla 2.13. Tabla de comandas de MATLAB..... | 68 |
| Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del Brazo Robótico Crust Crawler..... | 72 |
| Tabla 3.1. Límites para la selección de materiales..... | 89 |
| Tabla 3.2. Factores de Seguridad para el Robot Manipulador..... | 91 |
| Tabla 4.1. Cotización del brazo robótico..... | 96 |
| Tabla 4.2. Valores de masa originales, modificados y mejora porcentual de las piezas del Brazo Robótico CrustCrawler..... | 101 |
| Tabla 4.3. Componentes y peso de cada elemento del brazo Robótico modificado..... | 101 |
| Tabla 4.4. Rendimiento de los motores..... | 102 |
| Tabla 4.5. Mejora del desplazamiento en los ejes..... | 104 |
| Tabla 4.6. Tabla de cumplimiento de las especificaciones técnicas..... | 104 |
| Tabla 4.7. Tabla comparativa del modelo CrustCrawler y el prototipo..... | 106 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Configuraciones anatómicas comunes de robots. | 6 |
| Figura 1.2. Nomenclatura de un Robot Manipulador | 8 |
| Figura 1.3. Configuración de muestra del CrustCrawler Pro-Series. | 9 |
| Figura 1.4. Esquema general del QFD. | 14 |
| Figura 1.5. Casa de la calidad aplicada al caso de definición de las características de un fogón de camping..... | 19 |
| Figura 1.6. Ejemplo simbología Módulos funcionales..... | 22 |
| Figura 2.1. Plano frontal acotado del disco de acople para el servo motor DYNAMIXEL MX64T y MX106T | 25 |
| Figura 2.2. Plano frontal acotado del disco de acople para el servo motor DYNAMIXEL MX28T | 26 |
| Figura 2.3. Distribución N.-1 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 27 |
| Figura 2.4. Distribución sobre el prisma de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 28 |
| Figura 2.5. Distribución N.-2 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 29 |
| Figura 2.6. Modelo en SolidWorks de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 30 |
| Figura 2.7. Distribución N.-3 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 30 |
| Figura 2.8. Distribución N.-4 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 31 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.9. Distribución N.-1 de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 32 |
| Figura 2.10. Distribución N.-2 de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 32 |
| Figura 2.11. Modelo en SolidWorks del Adaptador de placa doble para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 33 |
| Figura 2.12. Modelo en SolidWorks del adaptador de placa simple para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 34 |
| Figura 2.13. Modelo parcial de la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 34 |
| Figura 2.14. Posición del trapecio isósceles para la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T. | 35 |
| Figura 2.15. Distribución N.-1 de circunferencias de piezas de la Viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T. | 35 |
| Figura 2.16. Modelo en SolidWorks de la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 36 |
| Figura 2.17. Distribución de circunferencias de la base de servo motor para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 37 |
| Figura 2.18. Modelo en SolidWorks de la base de servo motor para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 37 |
| Figura 2.19. Distribución N.-1 de semi-óvalos de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 38 |
| Figura 2.20. Distribución N.-1 de circunferencias de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T. | 39 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.21. Rectángulo de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 39 |
| Figura 2.22. Distribución N.-2 de semi-óvalos de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 40 |
| Figura 2.23. Distribución N.-21 de circunferencias de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 40 |
| Figura 2.24. Modelo en SolidWorks de la mesa base..... | 41 |
| Figura 2.25. Modelo en SolidWorks del disco..... | 41 |
| Figura 2.26. Distribución sobre el prisma de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX64T..... | 43 |
| Figura 2.27. Modelo en SolidWorks de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX64T..... | 44 |
| Figura 2.28. Modelo en SolidWorks de la viga de 63.5mm para el servo motor DYNAMIXEL MX64T. | 45 |
| Figura 2.29. Distribución N.-1 de semi-óvalos para la adaptadora tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX-64T..... | 46 |
| Figura 2.30. Distribución N.-2 de semi-óvalos para el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX-64T. | 46 |
| Figura 2.31. Modelo en SolidWorks para el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX64T. | 47 |
| Figura 2.32. Distribución de circunferencias N.-1 de la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 48 |
| Figura 2.33. Figura geométrica de la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 48 |
| Figura 2.34. Perforación de la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 49 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.35. Distribución de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 49 |
| Figura 2.36. Modelo en SolidWorks para las articulaciones para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 50 |
| Figura 2.37. Modelo en SolidWorks de la base de servo motor reducida para el servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 51 |
| Figura 2.38. Figura Geométrica N.-1 de la pinza para el servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 52 |
| Figura 2.39. Figura Geométrica N.-2 de la pinza para el servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 52 |
| Figura 2.40. Distribución de semi-óvalos de la Pinza para el Servo Motor DYNAMIXEL MX28T. | 53 |
| Figura 2.41. Modelo en SolidWorks de la pinza para motor reducida para el servo motor DYNAMIXEL MX28T. | 53 |
| Figura 2.42. Optimización del 45% del Adaptador de Placa Simple. | 55 |
| Figura 2.43. Optimización del 50% para el Adaptador de Placa Doble. | 56 |
| Figura 2.44. Optimización del 30% para la Viga de 127mm. | 57 |
| Figura 2.45. Optimización del 45% para la Viga de 63.5mm. | 58 |
| Figura 2.46. Optimización del 25% para el Adaptador Tipo L. | 59 |
| Figura 2.47. Optimización del 50% para la Articulación de Pinza. | 60 |
| Figura 2.48. Optimización del 30% para la Articulación. | 61 |
| Figura 2.49. Optimización del 50% para la Bases para Servo Motor. | 62 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.50. Articulaciones y eslabones del Brazo Robótico Crust Crawler. | 63 |
| Figura 2.51. Diagramas de cuerpo libre de los Eslabones del Brazo Robótico CrustCrawler. | 66 |
| Figura 2.52. Gráfico de la variable Ptesis. | 69 |
| Figura 2.53. Gráficas del desplazamiento en los ejes para el Manipulador. | 70 |
| Figura 2.54. Casa de Calidad del Brazo Robótico a modificar..... | 71 |
| Figura 2.55. Diagramas Funcionales del Brazo Robótico Crust-Crawler. | 73 |
| Figura 2.56. Módulos para el análisis funcional del Brazo Robótico CrustCrawler. | 74 |
| Figura 3.1. Parámetros a modificar en la articulación del servo motor DYNAMIXEL MX106T | 77 |
| Figura 3.2. Propuesta a realizarse en articulación del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 78 |
| Figura 3.3. Parámetros a modificar en el adaptador de placa doble del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 78 |
| Figura 3.4. Propuesta a realizarse en el adaptador de placa doble del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 79 |
| Figura 3.5. Parámetros a modificar en el adaptador de placa simple del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 79 |
| Figura 3.6. Propuesta a realizarse en el adaptador de placa simple del servo motor DYNAMIXEL MX106T | 80 |
| Figura 3.7. Parámetros a modificar en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 80 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.8. Propuesta a realizarse en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 81 |
| Figura 3.9. Parámetros a modificar en la viga de 63.5mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 82 |
| Figura 3.10. Propuesta a realizarse en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 83 |
| Figura 3.11. Parámetros a modificar en el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 83 |
| Figura 3.12. Propuesta a realizarse en el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX106T..... | 84 |
| Figura 3.13. Parámetros a modificar en la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 85 |
| Figura 3.14. Propuesta a realizarse en la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 85 |
| Figura 3.15. Parámetros a modificar en la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 86 |
| Figura 3.16. Propuesta a realizarse en la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 86 |
| Figura 3.17. Ampliación de la base para servo motor reducida..... | 87 |
| Figura 3.18. Base para servo motores reducida modificada..... | 87 |
| Figura 3.19. Ampliación de la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 88 |
| Figura 3.20. Ampliación de la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T..... | 88 |
| Figura 3.21. Tensión von Mises para el Adaptador de Placa Doble del Brazo Robótico CrustCrawler..... | 90 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.22. Gráficas del desplazamiento en los ejes para el nuevo manipulador..... | 92 |
| Figura 4.1. Cuatro vistas estándar del plano. | 93 |
| Figura 4.2. Detalles y Secciones del plano..... | 94 |
| Figura 4.3. Cotas y vista abatida para el plano..... | 94 |
| Figura 4.4. Plano general del Brazo Robótico. | 95 |
| Figura 4.5. Impresora Cincel3D Printer..... | 95 |
| Figura 4.6. Ensamblaje de la base. | 97 |
| Figura 4.7. Ensamble del primer eslabón. | 98 |
| Figura 4.8. Ensamblaje del segundo eslabón. | 98 |
| Figura 4.9. Ensamblaje del tercer eslabón..... | 99 |
| Figura 4.10. Ensamblaje del cuarto eslabón..... | 99 |
| Figura 4.11. Ensamble final de brazo robótico..... | 100 |
| Figura 4.12. Comparación de graficas de desplazamiento en los ejes. | 103 |

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se basa en ingeniería inversa y morfogénesis, metodologías que son posibles aplicar por medio de la asistencia computacional y en este caso para optimizar la estructura del modelo de brazo robótico propuesto por CrustCrawler, de forma que se tenga resultados estáticos o dinámicos de las diversas modificaciones que se propongan. Entre las alternativas está el uso de materiales alternativos, al mismo tiempo que para la obtención de resultados se pretende usar software poco usual e innovador, de esta forma se pretende promover ideas modernas para el diseño de estructuras y al mismo tiempo originar el uso de programas diferentes a los comunes en nuestro medio. La tesis que es: **“Diseño y construcción de la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa para la Universidad de las Fuerzas Armadas– ESPE extensión Latacunga”** tendrá tres etapas en donde se aplicará ingeniería inversa y morfogénesis para determinar el diseño más óptimo y finalmente la construcción de nuevas partes. Para ellos se pretende modelar y analizar minuciosamente cada parte de la estructura, de tal forma que, se pueda tener un mayor control sobre el mismo y facilidad de operación. Siendo parte del proyecto de investigación denominado: Diseño y construcción de un brazo robótico de seis grados de libertad con software libre.

Palabras clave: Ingeniería inversa, estructura, construcción, brazo robótico, materiales alternativos.

ABSTRACT

The present research project is based on reverse engineering and morphogenesis, applied methodologies that are possible through computational assistance in this case for optimizing the structure of the model proposed by CrustCrawler robotic arm, so that static or dynamic results have of the various amendments proposed. Among the alternatives is the use of alternative materials, while for obtaining results is intended to use unusual and innovative software in this way is to promote modern ideas for the design of structures and at the same time create using programs different from those common in our environment. The thesis: "**Design and construction of the structure of a robotic arm with six degrees of freedom by applying reverse engineering for the University of the Armed Forces - ESPE Latacunga extension**" will have three stages where reverse engineering and applied morphogenesis to determine the optimal design and finally the construction of new parts. They aim to model and dissect each part of the structure, so that it can have more control over it and ease of operation. Being part of the research project entitled: Design and construction of a robotic arm with six degrees of freedom with free software.

Keywords: Reverse engineering, structure, construction, robotic arm alternative materials.

PRESENTACIÓN

En el presente proyecto se desarrolla un prototipo de la estructura de un robot manipulador de seis ejes, el cual permite transportar piezas pequeñas de una gran complejidad.

El Capítulo I contiene información referente a máquinas y prototipos de manipuladores, es decir los recursos existentes que se disponen para realizar la parte mecánica, además de los principios físicos y matemáticos del mismo; información necesaria para el desarrollo del proyecto.

El Capítulo II detalla la metodología de análisis a usarse en los elementos mecánicos de un prototipo del robot manipulador de 6 ejes, donde se realizó ingeniería inversa y concurrente para un adecuado entendimiento de la estructura.

El Capítulo III detalla el diseño del prototipo, donde se determinan sus parámetros y modificaciones para cumplir las funciones determinadas.

El Capítulo IV consta de la construcción del robot manipulador de seis ejes para proceder a realizar pruebas de funcionamiento.

Las conclusiones y recomendaciones del proyecto se detallan en el Capítulo V, las cuales permitirán realizar proyectos futuros a gran escala.

Se incluye anexos y referencias bibliográficas para profundizar en el tema.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. GENERALIDADES

La Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga a través de la Jefatura de Investigación y Vinculación con la Colectividad y la carrera de Ingeniería Mecatrónica colabora en el desarrollo científico y tecnológico de las áreas relacionadas a la fabricación de prototipos robóticos a fin de aportar un avance significativo en cuanto al entendimiento y la fabricación de los mismos para el uso ya sea a nivel académico o inclusive a nivel industrial.

La presentación de este proyecto significará mantener el estado actual del desarrollo de la investigación en el sistema educativo universitario colaborando con el desarrollo que requiere el país para solucionar problemas de la colectividad como el mejoramiento de la calidad de vida, generación de empleo y de esta forma lograr un país más competitivo que pueda insertarse en las condiciones de desarrollo del mundo actual.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Considerando las características estructurales de la serie de Brazos Robóticos Inteligentes de CrustCrawler Pro-Series, se han determinado las siguientes observaciones:

- Se utiliza en la estructura un liviano aluminio, mas cabe indicar que el Brazo Robótico tiene aplicaciones industriales, aun así la construcción de este sistema en el Ecuador se complica por falta de materiales, en este caso se requiere cambiar el material para su estructura.
- Dada la investigación referente a las condiciones externas e internas que pueden afectar al brazo a partir del modelo propuesto por CrustCrawler se considera necesario el **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN BRAZO**

ROBOTICO CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD, APLICANDO INGENIERÍA INVERSA” como fundamento también se tiene que la situación actual del Ecuador se ve limitada al avance tecnológico.

- Estimando la importancia del desarrollo de este proyecto es fundamental la actualización tecnológica que presentan los Brazos Robóticos para mejorar cualquier proceso automatizado pero para cualquier usuario no necesariamente industrial. Debido a esta razón al implementar este proyecto se mejora el desempeño de la maquinaria en las diversas condiciones de uso.

1.3. OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar y construir la estructura de un Brazo Robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa para la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

ESPECÍFICOS

- Recopilar información proveniente de artículos técnicos, libros, monografías, tesis o ensayos sobre el diseño de Brazos Robóticos con seis grados de libertad.
- Realizar ingeniería inversa y morfogénesis al Brazo Robótico CrustCrawler y recopilar datos estructurales útiles para la ejecución del proyecto para obtener un modelo matemático con la ayuda de CAE que cumpla con las exigencias de diseño a realizarse en la estructura del Brazo Robótico.
- Diseñar e implementar un prototipo digital de la estructura del Brazo Robótico mediante el uso de CAD.
- Realizar la simulación de fuerzas actuantes, momentos y del movimiento sobre la estructura del Brazo Robótico mediante el uso de CAE.

- Generar una base de datos con la información para de esta forma realizar una comparación con los datos pre-configurados.
- Construir la estructura del Brazo Robótico teniendo en cuenta las conclusiones realizadas por parte de los simuladores.

1.4. ALCANCE

En la actualidad y debido al avance de la industria nacional se ha generado una demanda de equipos más precisos, rápidos y actualizados tecnológicamente para poder realizar operaciones con mayor efectividad

Una de las finalidades de este proyecto es obtener la capacidad de producir Robots Manipuladores en el país; para lo cual, necesariamente se generará fuente de trabajo y vincular a la universidad con la colectividad.

Las técnicas de diseño que se presentan en este proyecto son innovadoras y están al alcance y comprensión de fabricantes, diseñadores, ingenieros, técnicos y alumnos.

1.5. ESTADO DE LA CIENCIA

1.5.1. Introducción a la Robótica

La robótica tiene sus orígenes en las obras de ciencia ficción, en las cuales se utilizaba el término robot, que proviene del checo para referirse a máquinas con forma humanoide.¹

La robótica es una ciencia aplicada que comprende campos como el diseño de máquinas, teoría del control, microelectrónica, programación de computadora, inteligencia artificial, neurología, anatomía y teoría de la producción. Los avances en diferentes ramas de la ciencia, contribuyen a mejorar las aplicaciones de la robótica.

Una obra checoslovaca publicada en 1917 por Karel Capek, denominada Rossum's Universal Robots, dio lugar al término robot. La palabra en checo

¹ Dormido, S. (1993). Robótica Industrial: Tecnología, programación y aplicación. 2da Edición. México D.F. McGraw Hill.

“robota” significa servidumbre o trabajo forzado; y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot. Los cuales deben obedecer las siguientes leyes.²

- **Primera ley:** Un robot no puede actuar contra un ser humano o mediante el descuido, permitir que un ser humano sufra daños.
- **Segunda ley:** Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflicto con la primera ley.
- **Tercera Ley:** Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

Un robot se puede definir como “un manipulador reprogramable y multifuncional, puede trabajar de forma continua y con flexibilidad”. Esta definición es muy apropiada, ya que a los robots se les puede programar y controlar sus movimientos, lo que les posibilita su adaptación a distintos medios de trabajo para realizar diversas tareas.

1.5.2. Robótica Industrial

El campo en que más se utilizan los robots es la industria, la diferencia de un robot industrial y todo tipo de robots, radica en el tipo de tareas para los cuales se destinan. El robot industrial es un dispositivo multifuncional, al contrario de las máquinas automáticas clásica que realiza de forma repetitiva un tipo determinado de operaciones. Se diseña en funciones de diversos movimientos que debe poder ejecutar; tomando en cuenta sus grados de libertad, campo de trabajo, su comportamiento estático y dinámico.³

El robot industrial posee la capacidad de reconfigurar su ciclo de trabajo, además la versatilidad y variedad de sus elementos terminales que le permiten adaptarse fácilmente a la evolución o cambio de los procesos de producción. La robótica puede definirse como “el estudio de la construcción,

²Bermejo,S. (2005). Desarrollo de robots Basados en el comportamiento. 1ra Edición. Santiago de Chile. UPC.

³ Dormido, S. (1993). Robótica Industrial: Tecnología, programación y aplicación. 2da Edición. México D.F. McGraw Hill.

ensamblaje, generación, programación y uso de los robots y autómatas en general". Mediante la utilización de nuevas estructuras mecánicas, nuevos métodos de control y percepción.

1.6. MECÁNICA DEL ROBOT

1.6.1. Materiales

Los robots pueden ser hechos de cualquier material. El medio ambiente y la misión del robot a menudo plantean graves limitaciones sobre los materiales que se pueden utilizar. La Fuerza Aérea tiene la esperanza de hacer que las mariposas robot puedan ejecutar tareas de reconocimiento. Aunque es cierto que la mayoría de los modelos están hechos de acero, una mariposa de acero no lograría llegar muy lejos.⁴

Muchos materiales diferentes están disponibles para el nuevo diseño del robot, y muchas consideraciones deben hacerse al momento de elegir los materiales:

Resistencia al peso: A menos que un robot móvil se va a utilizar en los combates de lucha de sumo o vientos muy fuertes, que tiene sentido mantener el peso. Una forma de lograr esto es reducir al mínimo tanto la cantidad y la densidad de los materiales de construcción. Tenemos que saber la resistencia del material antes de reducir al mínimo la cantidad utilizada. Seleccionar material de elementos estructurales puede ser una decisión muy compleja, para ello se requiere un conocimiento avanzado de la ingeniería estructural y de simulación. Se debe seleccionar un material que no es muy denso o que sea algo más simple. El parámetro clave para tener en cuenta es la relación resistencia-peso. Los materiales que son muy fuertes por su densidad ayudan a mantener el peso del robot hacia abajo. La selección de tales materiales es algo complicado por el hecho de que ciertos tipos de fuerza dependen de la forma y la formación del material utilizado. Por ejemplo; una estructura de cartón bien plegada puede contener mucho más peso que una sola pieza de cartón.

⁴ Bergren, C. (2003). Anatomía del Robot. 3ra Edición. Chicago. McGraw - Hill

Mecanizado y formación: No necesariamente tener un material muy fuerte, si no se puede moldear en las formas requeridas para el robot.

Costo: La mayor parte del costo de los materiales estará relacionado con los costos de mecanizado, excepto para metales muy duros y compuestos especiales, no cuestan casi nada.

Disponibilidad: Metales, madera y plásticos son relativamente fáciles de conseguir. Los materiales compuestos no son tan difíciles de encontrar, la mayoría de estos materiales se pueden comprar en las formas preformadas como tubos, láminas, esferas, etc. Se considera la posibilidad de iniciar el diseño usando piezas preformadas, que pueden ofrecer una gran fuerza y precisión.

1.6.2. Anatomía del robot

La anatomía del robot se refiere a la construcción física del robot (cuerpo, brazo, muñeca). En el caso del brazo robótico, los movimientos relativos entre los diversos componentes del cuerpo, brazo y muñeca son proporcionados por una serie de articulaciones. El efecto final del robot no se considera como parte de la anatomía del artefacto.

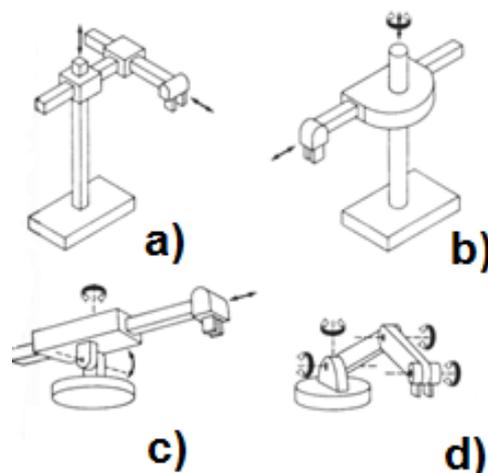


Figura 1.1. Configuraciones anatómicas comunes de robots.⁵

⁵Gonzales, R. (2005). Robótica: Control, detección, visión e inteligencia. 2da Edición. Madrid. Mcgraw Hill.

Existen cuatro configuraciones comunes de robots:

- a) Configuración polar
- b) Configuración cilíndrica
- c) Configuración de coordenadas cartesianas
- d) Configuración de brazo articulado

Cada una de estas se diferencian por el tipo de movimiento que pueden realizar, como se observa en la figura 1.1.

1.6.3. Cinemática del Robot Manipulador

La cinemática es una parte de la física que estudia el movimiento en el espacio y tiempo.⁶

La cinemática del brazo del robot es interesante por la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular de las relaciones entre la posición de las variables de articulación, y la posición y orientación del actuador final del brazo del robot.

En la cinemática del robot existen dos preguntas importantes:

Dado un vector de ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos del elemento (dimensiones de las articulaciones) y si se tiene los ángulos de las articulaciones, entonces:

$$Q_{(t)} = (Q1_{(t)} + Q2_{(t)} + Q3_{(t)}) * T \quad \text{Ec.1.1}$$

Donde T es el número de ejes del brazo del robot, para plantear la ecuación se debe averiguar la coordenada (x, y, z) en la que se encuentra el actuador final.

Dada una posición y orientación deseada del actuador final del manipulador y los parámetros geométricos de los elementos con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, es decir dada la coordenada (x, y,

⁶Craig, J. (2006). Robotica. 3ra Edición. México DF. Pearson Education.

z) en la cual se desea colocar al efector final de un brazo robótico de T ejes ecuación 1.1, se deben obtener los ángulos de articulación correspondientes del robot de manera que se puedan posicionar como se desea el efecto final.

Con el fin de controlar la posición y orientación del efecto final de un robot para alcanzar su objeto, es más importante la solución cinemática inversa. La nomenclatura tradicional para el estudio cinemático es la siguiente:

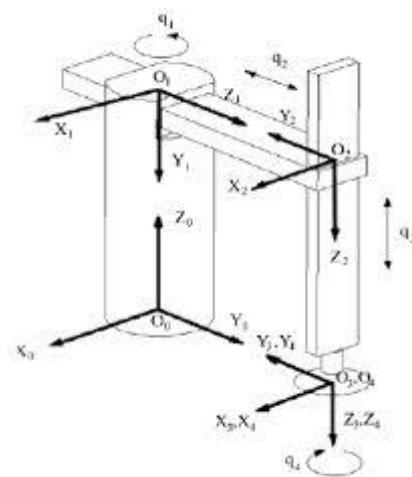


Figura 1.2. Nomenclatura de un Robot Manipulador⁷

Lo mostrado en la figura 1.2 se interpreta de la siguiente forma:

- θ_i es el ángulo de X_{i-1} a X_i medido sobre Z_i
- d_i es el ángulo de X_{i-1} a X_i medido sobre Z_i
- α_i es el ángulo de Z_{i-1} a Z_i medido sobre X_{i-1}
- a_i es el ángulo de Z_{i-1} a Z medido sobre X_{i-1}

El criterio de Grübler-Kutzbach es el más acertado para determinar los grados de libertad de un sistema mecánico plano el cual está descrito por la ecuación 1.2.

⁷ Gonzales, R. (2005). Robótica: Control, detección, visión e inteligencia. 2da Edición. Madrid. Mcgraw Hill.

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad \text{Ec.1.2.}$$

Dónde:

- m , movilidad.
- n , número de eslabones de un mecanismo.
- j_1 , número de uniones de 1 grado de libertad.
- j_2 , número de uniones de 2 grados de libertad.

1.7. MECÁNICA DEL ROBOT CRUSTCRAWLER

Se utilizan nueve motores, material plástico y metálico para la construcción del brazo robótico. Cada una de las articulaciones del robot es activada por medio de servo motores, de tal forma que se obtengan los movimientos deseados tanto de las articulaciones como los de las pinzas. La ilustración que se muestra a continuación es un ejemplo de la configuración de los componentes del brazo robótico CrustCrawler Pro-Series.⁸

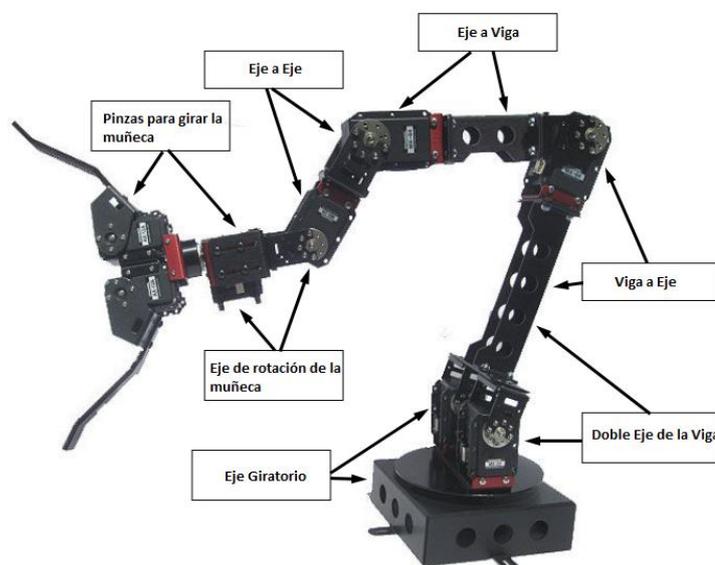


Figura 1.3. Configuración de muestra del CrustCrawler Pro-Series.⁹

⁸Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

⁹Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

Las componentes de los ejes del CrustCrawler Pro-Series están diseñadas para poder ser unidos en diferentes configuraciones utilizando herramientas simples para su ensamblaje que se logran visualizar en el Anexo D. Los motores utilizados pertenecen a la marca DYNAMIXEL, dentro del robot se utilizaron tres modelos los cuales son: Las características de los motores se presentan a continuación en las siguientes tablas, que son información proporcionada por el fabricante.

- Motor DYNAMIXEL MX-28T.
- Motor DYNAMIXEL MX-64T.
- Motor DYNAMIXEL MX-106T.¹⁰

Tabla 1.1. Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-28T.¹¹

| Característica | DYNAMIXEL MX-28T | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----|------|
| Peso | 72g | | |
| Dimensiones | 35.6mmx50.6mmx35.5mm | | |
| Relación de transmisión | 193:1 | | |
| Voltaje de operación(V) | 10 | 12 | 14.8 |
| Torque máximo | 2.3 | 2.5 | 3.1 |
| Corriente máximo | 1.3 | 1.4 | 1.7 |
| Velocidad sin carga | 50 | 55 | 67 |
| Motor | Maxon Motor | | |
| Voltaje de operación | 10-14.8V (Recomendado:12V) | | |
| Temperatura de operación | 5 a 80 °C | | |
| Señal de mando | Paquete digital | | |
| Protocolo | Señal asincrónica Half-Duplex | | |
| Enlace(Físico) | TTL Multi Drop Bus | | |
| ID | 254 ID (0-253) | | |
| Velocidad de transmisión | 8000bps - 3Mbps | | |
| Retroalimentación | Posición, temperatura, etc. | | |
| Material | Est: Plástico, Eng: Metal | | |

¹⁰ Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

¹¹ DYNAMIXEL.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/MX28/docs/DYNAMIXEL%20MX28T.pdf> [citado:03-02-2014]

Tabla 1.2. Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-64T.¹²

| Característica | DYNAMIXEL MX-64T | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----|------|
| Peso | 126g | | |
| Dimensiones | 40.2mmx61.1mmx41mm | | |
| Relación de transmisión | 200:1 | | |
| Voltaje de operación(V) | 10 | 12 | 14.8 |
| Torque máximo | 5.5 | 6 | 7.3 |
| Corriente máximo | 3.9 | 4.1 | 5.2 |
| Velocidad sin carga | 58 | 63 | 78 |
| Motor | Maxon Motor | | |
| Voltaje de operación | 10-14.8V (Recomendado:12V) | | |
| Temperatura de operación | 5 a 80 °C | | |
| Señal de mando | Paquete digital | | |
| Protocolo | Señal asincrónica Half-Duplex | | |

Tabla 1.3. Especificaciones del Motor DYNAMIXEL MX-106T.¹³

| Característica | DYNAMIXEL MX-106T | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----|------|
| Peso | 153g | | |
| Dimensiones | 40.2mmx65.1mmx46mm | | |
| Relación de transmisión | 4800:00:00 | | |
| Voltaje de operación(V) | 10 | 12 | 14.8 |
| Torque máximo | 8 | 8.4 | 10 |
| Corriente máximo | 4.8 | 5.2 | 6.3 |
| Velocidad sin carga | 41 | 45 | 55 |
| Motor | Maxon Motor | | |
| Voltaje de operación | 10-14.8V (Recomendado:12V) | | |
| Temperatura de operación | 5 a 80 °C | | |
| Señal de mando | Paquete digital | | |
| Protocolo | Señal asincrónica Half-Duplex | | |
| Enlace(Físico) | TTL Multi Drop Bus | | |
| ID | 254 ID (0-253) | | |
| Velocidad de transmisión | 8000bps - 3Mbps | | |
| Retroalimentación | Posición, temperatura, etc. | | |

¹² DYNAMIXEL.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/RX64/docs/DYNAMIXEL%20MX64T.pdf> [citado:03-02-2014]

¹³ DYNAMIXEL.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/EX106/docs/DYNAMIXEL%20X106T.pdf> [citado:03-02-2014]

El Brazo robótico CrustCrawler Pro-Series se puede construir a partir de la mesa giratoria hacia arriba en las siguientes configuraciones:

- Placa giratoria de doble eje
- Placa giratoria a un solo eje
- Placa giratoria de la viga
- Doble eje de la viga
- Un solo eje a la viga
- Eje a Eje
- Eje de la viga
- Viga de Axis
- Eje de Rotación de la muñeca

1.8.INGENIERÍA INVERSA, MORFOGÉNESIS E INGENIERÍA CONCURRENTE

El objetivo de la ingeniería inversa es obtener información o un diseño a partir de un producto accesible al público, con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado.

Hoy en día los productos más comúnmente sometidos a ingeniería inversa son los programas de computadoras y también los componentes electrónicos pero en realidad, cualquier producto puede ser objeto de un análisis de ingeniería inversa.

El método se denomina así porque avanza en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería, que consisten en utilizar datos técnicos para elaborar un producto determinado. En general, si el producto u otro material que fue sometido a la ingeniería inversa fueron obtenidos en forma apropiada, entonces el proceso es legítimo y legal. De la misma forma, pueden fabricarse y distribuirse legalmente los productos genéricos creados

a partir de la información obtenida de la ingeniería inversa, como es el caso de algunos proyectos de Software libre ampliamente conocidos.

1.9. DESARROLLO DE FUNCIÓN DE CALIDAD

El desarrollo de la función de calidad (QFD) es un método globalizador cuyo objetivo principal es asegurar que en la definición de un producto o servicio se han considerado las necesidades y requerimientos de los usuarios (o, la voz del usuario), a la vez que también constituye una herramienta para la planificación de la calidad durante el ciclo de vida. Consiste en un proceso estructurado que permite traducir los requerimientos y deseos de los usuarios en requerimientos técnicos de ingeniería en cada fase del diseño y de la fabricación.

El concepto QFD fue introducido por primera vez en Japón en el año 1972, e inmediatamente tuvo una gran aceptación en este país; más tarde, en 1983 fue introducido en EE.UU. de la mano de Yoji Akao; y, hoy día se utiliza en numerosas empresas de los países.

QFD es un método que presupone el establecimiento de un equipo pluridisciplinario orientado al consenso, basado en aproximaciones creativas y que permite la síntesis de nuevas ideas de una manera estructurada.¹⁴

1.9.1. Las cuatro fases

Yoji Akao definió una serie de matrices para guiar el proceso del desarrollo de la función de calidad. Cada fase del desarrollo de un producto (planificación del producto, despliegue de componentes, planificación del proceso y planificación de la producción) se representa por una matriz cuyas características de diseño aportan las especificaciones de entrada a la matriz siguiente: en una secuencia en forma de una cascada de cuatro saltos (figura 1.6):

- **Planificación del producto:** Traduce las demandas de los clientes en características técnicas del producto.

¹⁴ Ribas, C. (2002). Diseño Concurrente. 2da Edición. Santiago de Chile. UPC

- **Despliegue de componentes:** Traduce las especificaciones del producto en características de los componentes.
- **Planificación del proceso:** Traduce las especificaciones de los componentes (o características de los componentes de la matriz anterior) en características del proceso de fabricación.
- **Planificación de la producción:** Traduce las especificaciones del proceso (o características del proceso de fabricación de la matriz anterior) en procedimientos de planificación de la producción.

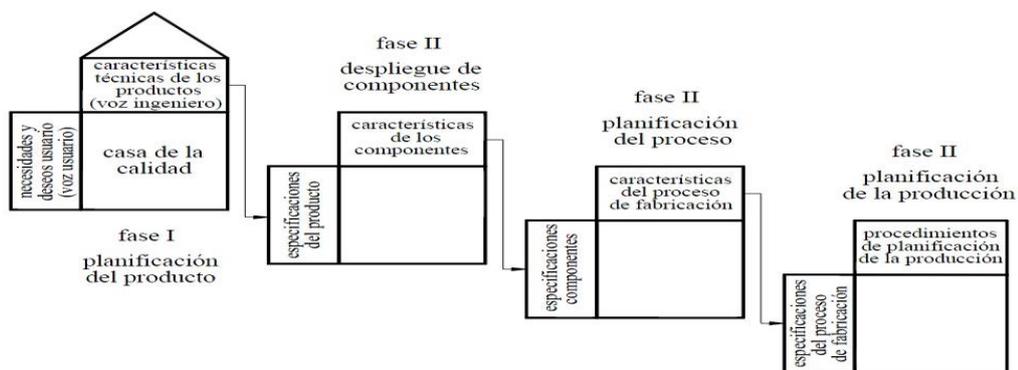


Figura1.4. Esquema general del QFD.¹⁵

1.9.2. La casa de calidad

La primera de estas matrices figuras 1.4 y 1.5, traduce las demandas de los usuarios en requerimientos técnicos del producto. Es la de aplicación más frecuente y en ella se distinguen 6 pasos:

- **Voz del usuario:** Describe las demandas (requerimientos y deseos) de los usuarios.
- **Análisis de competitividad:** Describe, según el usuario, el grado de satisfacción que proporcionan los productos o servicios de la empresa respecto a los de la competencia.
- **Voz del ingeniero:** Describe los requerimientos técnicos que deberán articularse para satisfacer las necesidades de los usuarios

¹⁵ Ribas, C. (2002). Diseño Concurrente. 2da Edición. Santiago de Chile. UPC

- **Correlaciones:** Establece las correlaciones entre la voz de los usuarios y la voz del ingeniero.
- **Comparación técnica:** Compara el producto de la empresa con los de la competencia.
- **Compromisos técnicos:** Establece los compromisos potenciales entre las diferentes características técnicas del producto.

En el desarrollo de la función de calidad, las demandas de los clientes constituyen el elemento conductor de todo el proceso de diseño de un nuevo producto o servicio. El primer paso consiste, en pedir a un grupo representativo de usuarios (en su sentido más amplio: distribuidores, vendedores, usuarios finales) cuáles son sus requerimientos y deseos. Una de las formas más frecuentes de hacerlo es a través del diagrama de afinidad. Se procede de la siguiente forma:

Se realiza una lluvia de ideas entre un grupo de clientes en relación a todos sus requerimientos y deseos sobre el nuevo producto, aunque sean expresados de forma vaga, incompleta y con redundancias. Por medio de un experto en el método QFD los requerimientos y deseos de los usuarios son formulados de forma precisa y útil como entradas al sistema.

Todas las demandas deben tener un mismo nivel de detalle; si la lista resulta demasiado larga (lo que sucede con frecuencia), deben agruparse las demandas bajo títulos más generales hasta identificar un máximo entre 20 y 30 categorías.

a) **Voz del usuario**

Según la percepción que el usuario tiene de ellas, estas demandas se clasifican en:

- **Demandas básicas:** A menudo no son formuladas por los usuarios ya que se consideran obvias; sin embargo cuando no se cumplen, el usuario manifiesta insatisfacción.

- **Demandas unidimensionales:** Con su mejora aumenta proporcionalmente la satisfacción de los usuarios.
- **Demandas estimulantes:** Estas características complacen al usuario y diferencian un producto de otro. En caso de no darse, no producen insatisfacción en el usuario con el tiempo, las demandas estimulantes se convierten en unidireccionales y éstas últimas en básicas.

b) Análisis de la competencia

A continuación, hay que plantear al grupo de usuarios las tres preguntas siguientes sobre el análisis de la competencia en relación con cada demanda: ¿Qué importancia tiene para usted su cumplimiento?, ¿En qué grado los productos de la empresa la cumplen? Y ¿En qué grado los productos de la competencia la cumplen?

Una vez obtenidas estas respuestas, evaluadas generalmente de 1 a 5:

- **Columna A:** evaluación del cumplimiento del producto de la empresa.
- **Columnas B y C:** evaluación del cumplimiento de los productos de la competencia.
- **Columna D:** Objetivos (fijación del nivel deseado, de 1 a 5).
- **Columna E:** Índice de mejora ($E = D/A \geq 1$).
- **Columna F:** Factor de venta (evaluación en niveles de 1/1,2/1,5).
- **Columna G:** Importancia (a partir de respuestas de los usuarios, de 1 a 5).
- **Columna H:** Ponderación ($H=E \cdot F \cdot G$).
- **Columna I:** Ponderación porcentual (en % sobre el total de las demandas).

Los datos se compilan y los resultados se introducen en la casa de la calidad.

c) La voz del ingeniero

El reto más importante en la construcción de la casa de la calidad es la traducción de las demandas subjetivas de los clientes en características técnicas objetivas del producto, lo que constituye la voz del ingeniero.

Para realizar este paso el equipo de diseño debe crear una lista de características técnicas medibles y al alcance de la empresa, que puedan dar cumplimiento a las demandas. Como mínimo para cada demanda se debe identificar una característica técnica. De forma análoga a las demandas de los clientes, su número máximo debe situarse entre 20 y 30.

d) Correlaciones

El cuerpo de la casa de la calidad muestra las capacidades de cada característica técnica para satisfacer al cliente en cada una de las demandas. En este paso hay que formularse la siguiente pregunta: ¿Hasta qué punto se podrá predecir que se van a satisfacer las demandas a partir de las características técnicas elegidas?

El resultado de esta pregunta debe obtenerse por consenso del equipo de diseño y se establece en tres niveles: fuerte, mediano y débil (simbolizados por un círculo con punto, un círculo y un triángulo, respectivamente; y, si no existe relación, el espacio se deja en blanco). Este trabajo de evaluación establece un lenguaje común entre los miembros del equipo de diseño y fomenta las comunicaciones entre los departamentos durante todo el proyecto.

e) Evaluación técnica

Este paso se realiza después de haber completado el cuadro de correlaciones del paso anterior y consiste en la evaluación de la incidencia de cada una de las características técnicas en la satisfacción de las demandas del usuario.

Para ello, el equipo de diseño calcula la incidencia de cada característica técnica en base al sumatorio de productos de los factores de incidencia, I_d , función de cada correlación (fuerte = 9; mediana = 3; débil = 1) por el correspondiente valor de la ponderación, que está en la columna H.

f) **Compromisos técnicos**

El techo de la casa de la calidad contiene los distintos compromisos entre las características técnicas del producto que la empresa debe sopesar y decidir para situarse lo mejor posible en el mercado. Se han establecido cuatro niveles de correlación con sus símbolos: muy negativa, negativa, positiva y muy positiva.

- **Correlación positiva:** Al mejorar una característica técnica, también mejora la otra.
- **Correlación negativa:** Al mejorar una característica técnica, empeora la otra.
- **Sin correlación:** Las variaciones de dos características técnicas no tienen influencia mutua.

La implantación del desarrollo de la función de calidad no es una tarea simple e involucra una serie de factores tales como la cultura de la empresa y la confianza con la mejora continua. Es una metodología que exige una gestión participativa presidida por el impulso y la confianza de la dirección general. Hay que informar a todo el personal de los objetivos del QFD y convencerlo de que el trabajo adicional de documentación y de recogida de datos que comporta es beneficioso.

En otro orden de cosas, la implantación del desarrollo de la función de calidad suele ser más simple si se aplica inicialmente a la mejora de un producto conocido. Más adelante se estará en condiciones de abordar el diseño de nuevos productos. La implementación de una casa de calidad se ejemplifica en la figura 1.5.

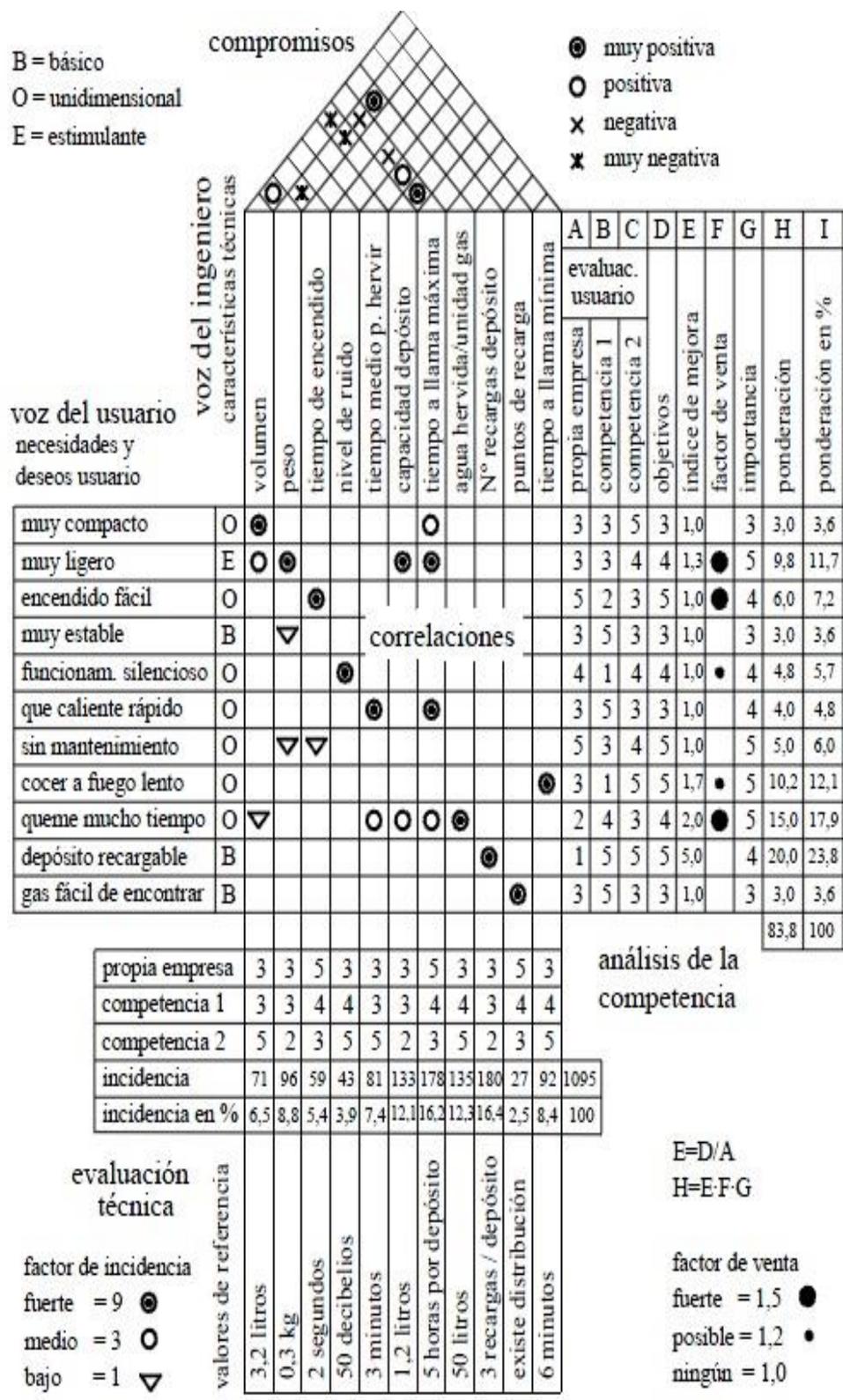


Figura 1.5. Casa de la calidad aplicada al caso de definición de las características de un fogón de camping.¹⁶

¹⁶ Ribas, C. 2002. Diseño Concurrente. 2da Edición. Santiago de Chile. UPC

1.9.3. Módulo e interfaces

El análisis funcional de un producto o sistema y la elaboración de la estructura funcional es un primer paso para establecer su estructura modular (la mayor parte de diseñadores realizan estos procesos sin formalizarlos), a partir de combinar las diversas funciones en módulos de forma que se consigan los dos objetivos prioritarios siguientes:

- **Agrupar las funciones en módulos:** Es conveniente que cada una de las funciones sea realizada por un solo módulo. En caso de no ser posible, hay que delimitar convenientemente la parte de la función que realiza cada módulo y sus interrelaciones. El establecer una estructura modular subdividida en mayor o menor grado es uno de los criterios que hay que analizar cuidadosamente.
- **Establecer interfaces adecuadas entre módulos:** Interfaces es cualquier superficie real o imaginaria entre dos módulos de un sistema, a través de la cual se establece alguna de las siguientes relaciones: unión mecánica, flujo de energía, flujo de materiales o flujo de señales.
- **Interfaz mecánica:** Superficie por medio de la cual se establece una unión mecánica entre dos módulos de un producto o sistema. Esta unión puede ser fija, si no permite el movimiento relativo entre las partes, o móvil (también enlace), si lo permite (función de una determinada geometría de contacto).
- **Interfaz de energía:** Superficie a través de la cual se establece un flujo de energía entre módulos de un producto o sistema (en casos límites, también de fuerzas, deformaciones o movimientos). Las interfaces de energía más frecuentes son las de alimentación eléctrica, de aire comprimido y de fluido hidráulico.
- **Interfaz de transferencia de materiales:** Superficie a través de la cual se establece un flujo de material entre módulos de un producto

o sistema. Por ejemplo, la alimentación de materia prima y la retirada de piezas acabadas en un torno.

- **Interfaz de señal:** Superficie a través de la cual se establece un flujo de señal entre módulos de un producto o sistema. Por ejemplo, la comunicación de la imagen entre la unidad central y la pantalla de un ordenador.

A menudo se puede partir en los diseños de un análisis limitado a las interfaces mecánicas e insuficiente por lo que respecta a otros flujos. Ello puede acarrear que los "detalles" de última hora (cableados, conducciones, alimentación de materiales), se transformen en problemas de muy difícil solución en una etapa del proyecto en la que las principales decisiones ya han sido tomadas.

Para facilitar la representación de las funciones y de los flujos en la estructura funcional de un producto o sistema, es conveniente disponer de símbolos adecuados cuya utilización sea lo suficientemente flexible.

Los símbolos que se ejemplifican en la figura 1.7 y están utilizados son los siguientes:

- **Función:** Rectángulo de línea continua.
- **Flujo de material y dirección:** Flecha de doble línea continua.
- **Flujo de energía y dirección:** Flecha de línea continua.
- **Flujo de señal y dirección:** Flecha de línea discontinua.
- **Sistema, subsistema, módulo:** Polígono de línea de punto y raya.

Las descripciones de los diferentes conceptos se realizan de la siguiente manera:

- **Funciones.** Se sitúan dentro del rectángulo y preferentemente se definen con un verbo seguido de un predicado: transferir pieza, mover brazo, controlar posición.

- **Flujos.** Su objeto se indica encima de las flechas correspondientes: de pieza en bruto, acabada; de alimentación eléctrica, de accionamiento del cabezal; de señal de puesta en marcha, de posición.
- **Sistema, subsistemas y módulos.** Se indica arriba y a mano izquierda del polígono que los delimita.

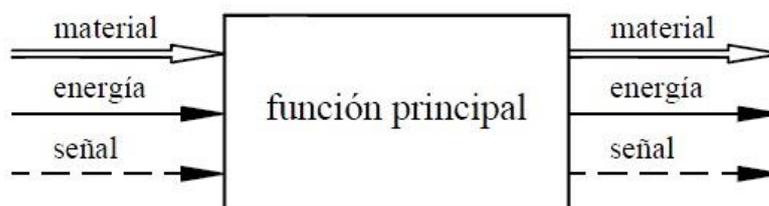


Figura 1.6. Ejemplo simbología Módulos funcionales.¹⁷

1.10. SOFTWARE CAE

Los beneficios de software de tipo CAE incluyen reducción del tiempo y costo de desarrollo de productos, con mayor calidad y durabilidad del producto, en el proyecto se utilizaran los siguientes programas:

- **MATLAB**

MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink y GUIDE. Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas; y, las de SimuLink con los paquetes de bloques.¹⁸

¹⁷ Ribas, C. (2002). Diseño Concurrente. 2da Edición. Santiago de Chile. UPC

¹⁸ Georing, R. (2004). <http://www.mathworks.com/products/matlab> [citado: 07-02-2014]

- **SOLIDTHINKING**

HyperWorks Altair Engineering es una ingeniería asistida por ordenador (CAE) de plataforma de software de simulación que permite a las empresas crear, productos líderes del mercado superiores manera eficiente y rentable. HyperWorks logra esto de dos maneras significativas.

Un modelo flexible de licencias de software que reemplaza costosos planes de licenciamiento tradicionales con un sistema de pago por uso. Los empleados a través de fronteras organizativas y geográficas podrán acceder simultáneamente no sólo la suite HyperWorks; sino también, una amplia gama de programas de terceros complementarios y otros productos Altair, sin costo adicional.¹⁹

- **SOLIDWORKS**

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una subsidiaria para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico. Fue introducido en el mercado en 1995.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.²⁰

- **COMSOL**

Es un programa en el que se puede modelar y simular cualquier sistema basado en la física utilizando el software de COMSOL. COMSOL Multiphysics incluye el COMSOL Desktop interfaz gráfica de usuario (GUI) y

¹⁹ Hyperworks,A.(2014).http://www.altair.com/ProductService.aspx?top_nav_name=Product%20and%20Services&item_name=Simulation%20Software [citado: 12-02-2014]

²⁰ Solidworks.(2014).<http://www.solidworks.com/sw/support/CustomerBulletins.html> [citado: 06-04-2014]

un conjunto de interfaces de usuario predefinidas con herramientas de modelado asociados, conocidos como interfaces físicas, para el modelado de aplicaciones comunes. Un conjunto de productos complementarios amplía esta plataforma de simulación multifísica para modelar áreas específicas de aplicación; así como la interfaz con el software de terceros y sus capacidades. COMSOL Multiphysics es necesario para ejecutar cualquiera de los productos de complemento.

Los módulos basados en la física aumentan las interfaces físicas básicas de COMSOL Multiphysics y proporcionan interfaces adicionales para el flujo de mecánica eléctrica de fluidos y aplicaciones químicas. Cualquier número de módulos se puede combinar sin problemas para manejar aplicaciones multifísicas desafiantes.²¹

²¹ COMSOL. (2014). <http://www.comsol.com/products> [citado: 06-04-2014]

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MODELADO DE PIEZAS.

Para la medición de cada pieza se utilizó un medidor de longitudes tipo pie de rey digital y como referencia adicional se tiene los planos de los tres modelos de servo motores DYNAMIXEL MX, utilizado en el Brazo Robótico CrustCrawler, cuyos planos se encuentran en los Anexos C.

Dado que en ellos se describe las dimensiones de los discos de acople para los servo motores DYNAMIXEL MX, en las figura 2.1 y figura 2.2 se observa los siguientes patrones:

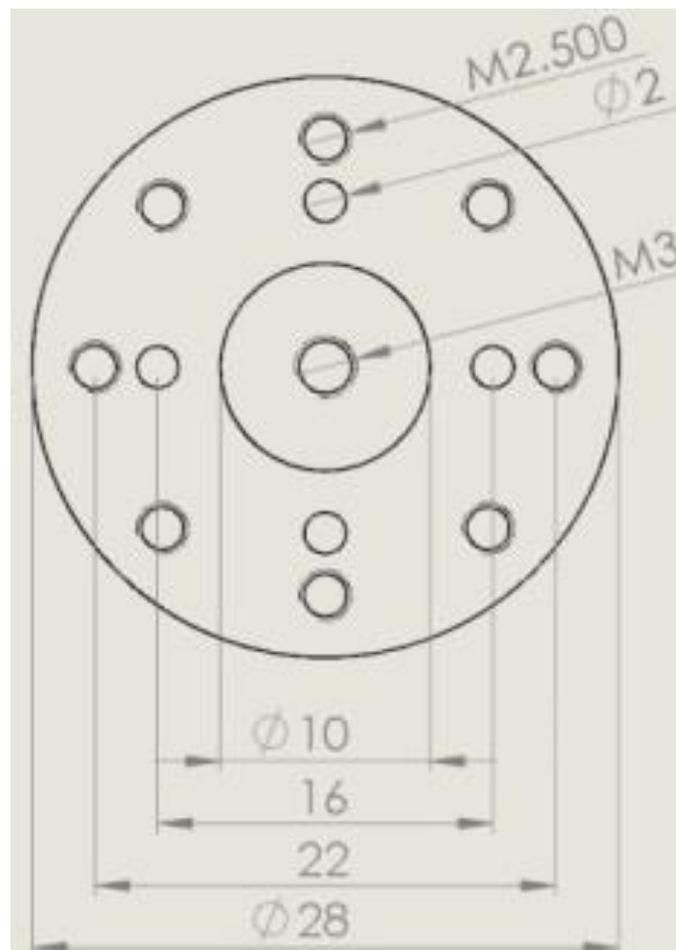


Figura 2.1. Plano frontal acotado del disco de acople para el servo motor DYNAMIXEL MX64T y MX106T.

Elaborado por Mena, J.

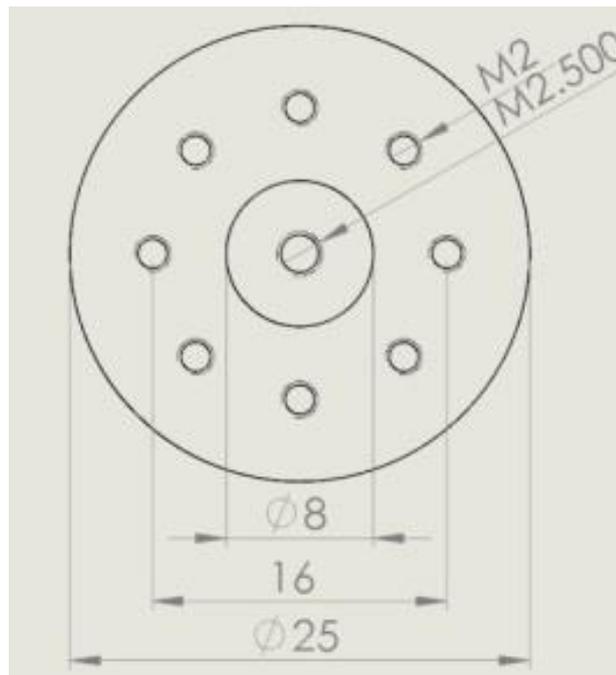


Figura 2.2. Plano frontal acotado del disco de acople para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Es necesario dar importancia en estas proporciones, puesto son las únicas medidas que se tiene del fabricante con respecto a toda las piezas de la estructura; además que, la distancia entre las perforaciones así como el diámetro de los mismos se repiten en todas las partes con propósitos de sujeción.

El justificativo para ampliar el diámetro de los discos es para reducir el torque generado por el peso de la estructura, al realizar esta modificación se podría variar las distancias y proporciones de cada pieza aumentando evidentemente su masa y costo, pero dado que la intención de este proyecto de tesis es principalmente reducir el material utilizado para cada pieza, se considera necesario mantener las dimensiones de los discos y mediante el uso de los diferentes Software de CAE poder reducir una cantidad de masa para cada componente, reduciendo costos pero sin comprometer la flexibilidad y dinamismo de toda la estructura.

El programa de CAD a usar para modelar todas las piezas es SolidWorks, tomando en cuenta que toda medida mostrada y descrita está

En la figura 2.3 se aprecia una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, diez circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno y finalmente ocho circunferencias de 2.2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno. Se realizó un corte de 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

En la vista superior se realizó dos rectángulos simétricos con respecto al centro de 7x10mm en la superficie del prisma, cuyos centros están a una distancia de 17.35mm del centro del prisma, se formó chaflanes de 2mm en las esquinas, cuatro circunferencias simétricas de 2.7mm que son tangentes a la proyección de los cuadrados y cuyos centros están a una distancia de 4.62mm de los mismos como se aprecia en la figura 2.4 y finalmente se realizó una corte de 2mm en el prisma dando como resultado perforaciones cilíndricas.

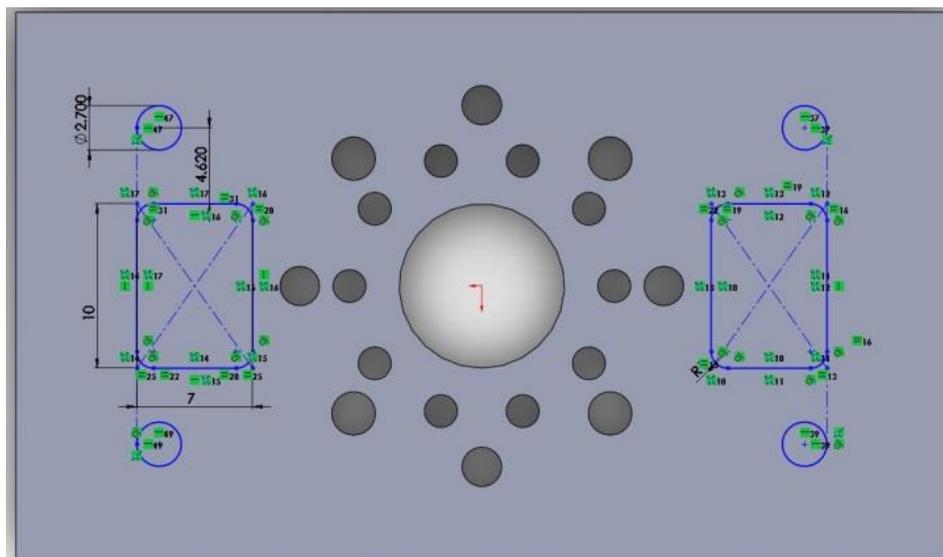


Figura 2.4. Distribución sobre el prisma de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se dibujó dos rectángulos simétricos coloniales a la parte superior e inferior del prisma de 2x51mm y dos rectángulos simétricos coloniales a los laterales del prisma de 28x2mm, para los dos primeros se realizó una extrusión de 5mm y para los laterales una extrusión de 37mm.

En la vista frontal de la pieza y sobre la superficie de la extrusión reciente de 37mm se dibujó dos rectángulos simétricos con respecto al centro de 15x5mm a una distancia de 9.5mm y 20.5mm de la base con respecto a sus centros, dos circunferencias de 1.5mm de diámetro que están 15mm distante de la base y a 8mm de distancia con respecto a la proyección paralela del centro de la base. Respetando la distribución establecida en la figura 2.1 se trazó las circunferencias mostradas en la figura 2.5 con la diferencia que se toma como centro a un punto que dista 36mm de la base. Se trazó una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, tres circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno y finalmente cinco circunferencias de 2.2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno. Se realizó un corte que atravesó las dos caras de 37mm, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

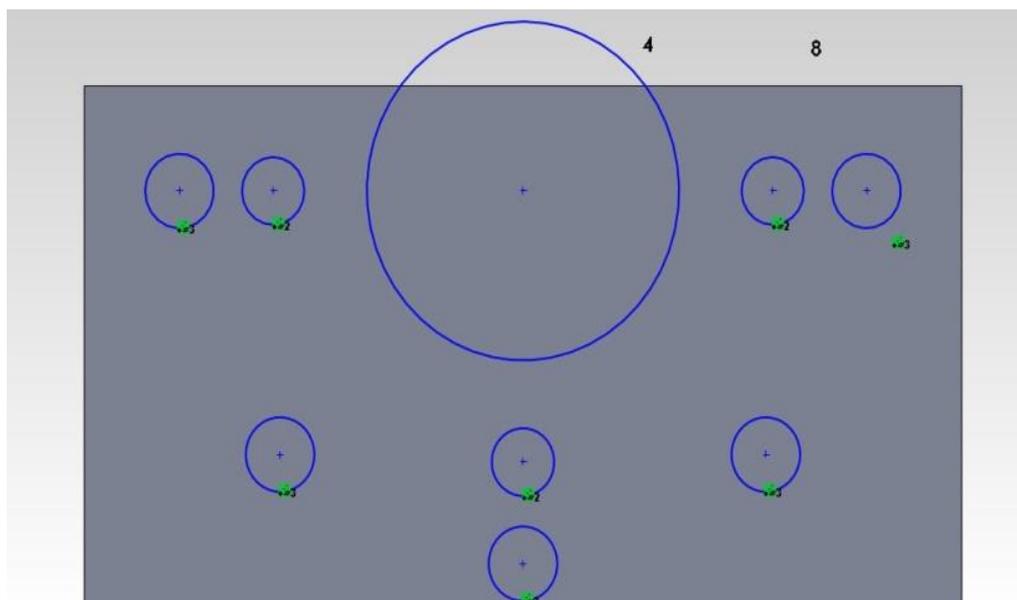


Figura 2.5. Distribución N.-2 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas salientes del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.6.

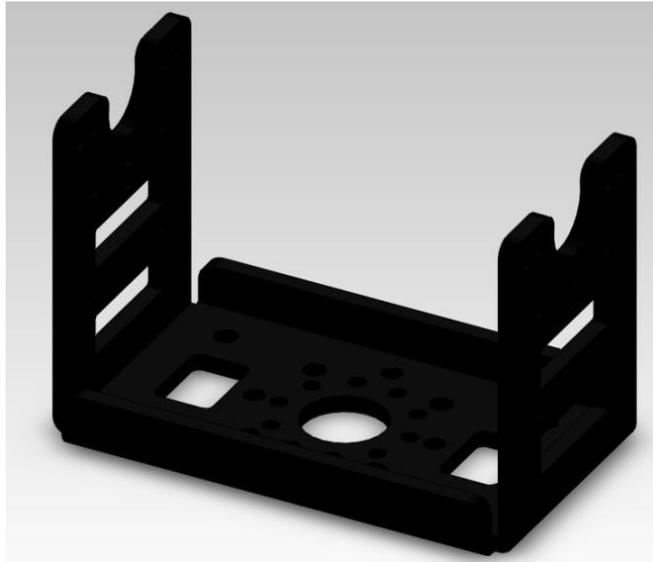


Figura 2.6. Modelo en SolidWorks de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

b) Adaptador de placa doble

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se trazó un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 102x31.5mm y se extruyó al rectángulo un total de 2mm, en la parte superior del prisma se realizó circunferencias de manera simétrica respetando las proporciones apreciables en la figura 2.1. Distribuidos de la siguiente forma:

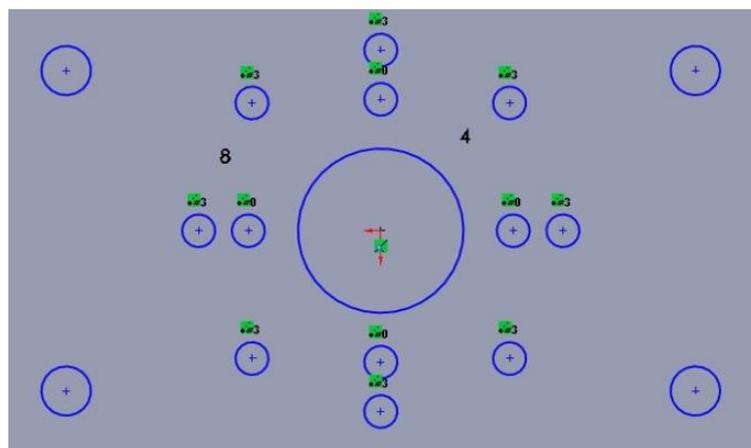


Figura 2.7. Distribución N.-3 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

En la figura 2.7 se aprecia una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, cuatro circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno, ocho circunferencias de 2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno y finalmente cuatro circunferencias que se encuentran a una distancia de 19mm y 9.5mm del centro con un diámetro de 3mm. Se cortó 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

En el plano superior se dibujó dos puntos que distan 37mm del centro, en el sentido positivo del eje X se formó ocho circunferencias de 2mm de diámetro que se encuentra a una distancia de 11mm de este segundo centro, ocho circunferencias con respecto al segundo centro, se eliminó cuatro de tal forma que los sobrantes formen un cuadrado como se ve en la figura 2.8.

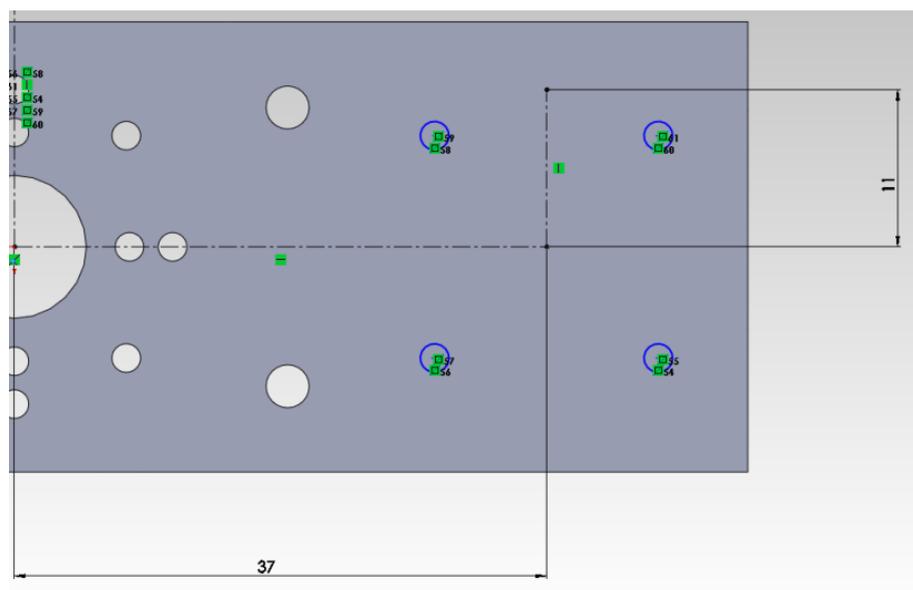


Figura 2.8. Distribución N.-4 de circunferencias de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se utilizó la herramienta de Entidades Espejo, se generó cuarteto semejante, usando como centro de referencia el eje Z positivo. Con el Asistente de Taladrado se realizó perforaciones de avellanado M2, siendo concéntricos con los círculos que se muestran en la figura 2.9.

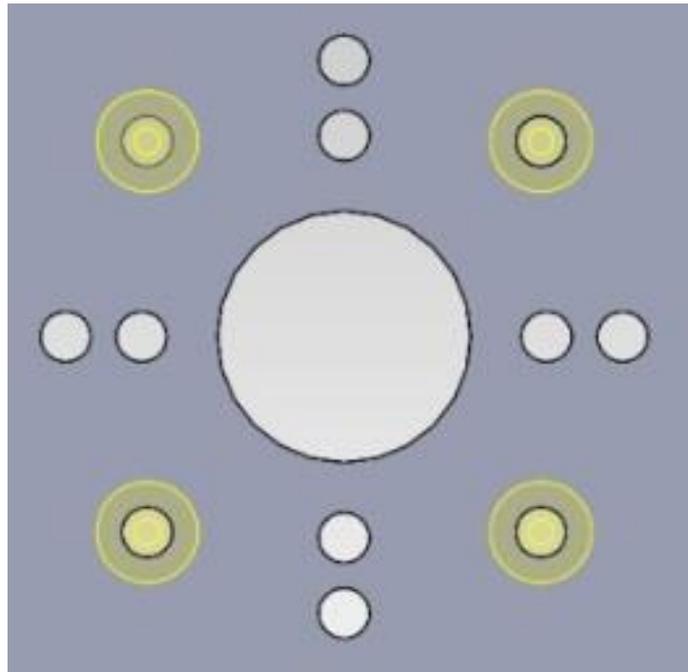


Figura 2.9. Distribución N.-1 de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Con el Asistente de Taladrado en la vista trasera se perforó ocho veces avellanados M2.5 como se muestra en la figura 2.10.

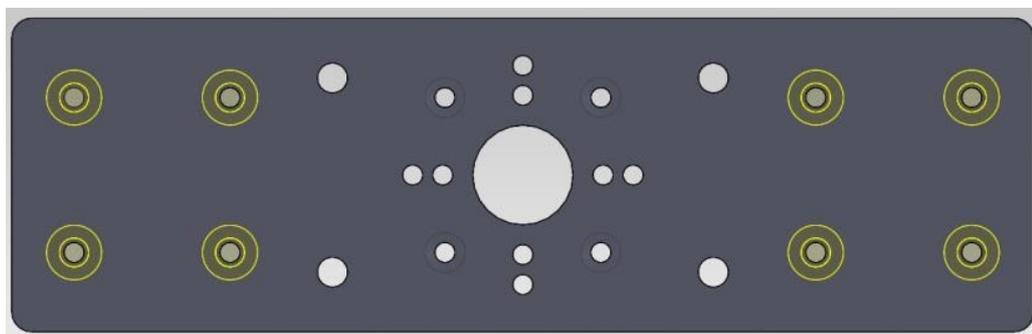


Figura 2.10. Distribución N.-2 de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.11.

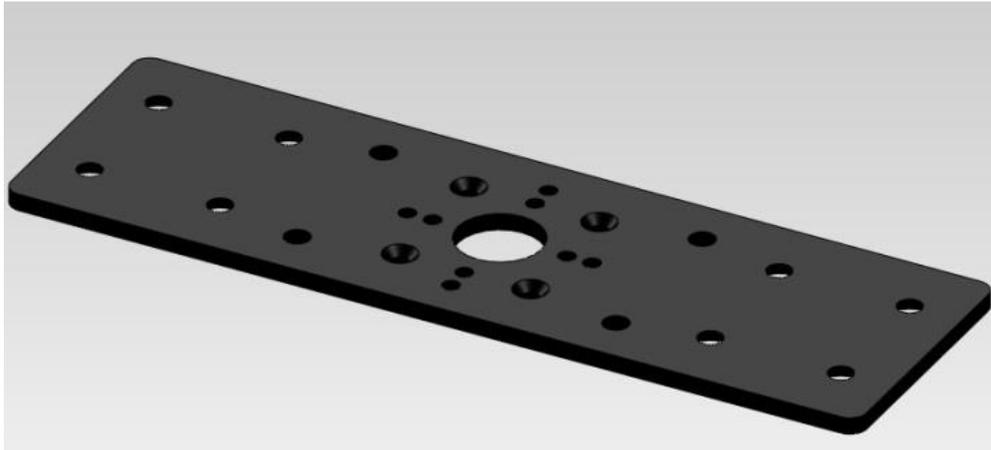


Figura 2.11. Modelo en SolidWorks del Adaptador de placa doble para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

c) Adaptador de placa simple

Se determinó las medidas del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se trazó un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 51x32mm y se extruyó al rectángulo un total de 2mm, a continuación en la parte superior del prisma se trazó circunferencias de manera simétrica respetando las proporciones apreciables en la figura 2.7. Con la singularidad de que se traza una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, cuatro circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno, ocho circunferencias de 2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno y cuatro circunferencias que se encuentran a una distancia de 19mm y 9.5mm del centro con un diámetro de 3mm. Se realizó un corte de 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

Utilizando el Asistente de Taladrado se perforó avellanado M2, siendo concéntricos con los círculos que se muestran en la figura 2.9.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.12.

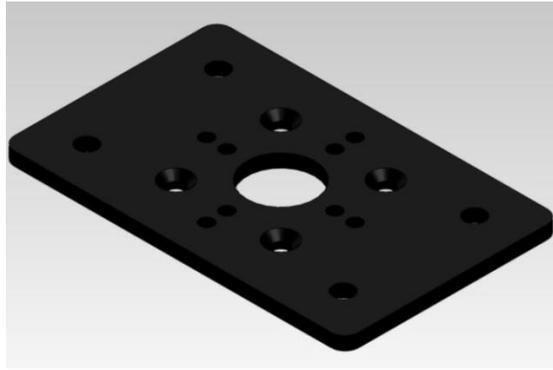


Figura 2.12. Modelo en SolidWorks del adaptador de placa simple para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

d) Viga de 127mm

Se determinó las medidas del ancho y alto de la pieza usando un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se trazó un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 33x25.2mm y se extruyó al rectángulo un total de 127mm. En la Vista Frontal del sólido se formó un rectángulo con medidas simétricas al centro del sólido de 21.5x127mm, finalmente se perforó 31mm.

En la vista lateral del sólido se colocó dos rectángulos ubicados en la parte superior e inferior con medidas de 2x33mm, se extruyó a los dos rectángulos un total de 13mm. Como siguiente paso se realizó el mismo procedimiento en el lado opuesto de la Vista lateral, teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.13.

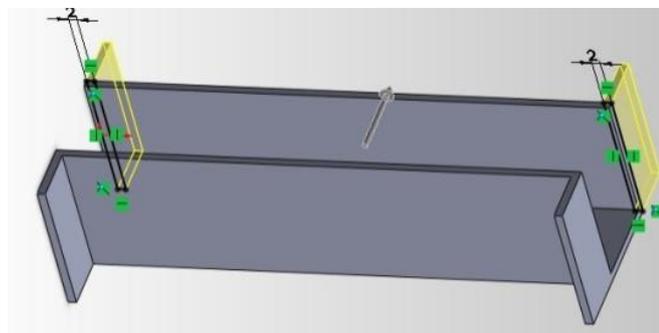


Figura 2.13. Modelo parcial de la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se trazó cuatro semi-óvalos de tal forma que sean concéntricos con respecto a las cuatro circunferencias de 3mm que se muestran en la figura 2.7 y de medidas 3.2x7.5mm y se cortó hasta la base del sólido.

Se dibujó un trapecio isósceles de 103mm de base mayor, 88mm de base menor y altura de 7.5mm como se muestra en la figura 2.14.

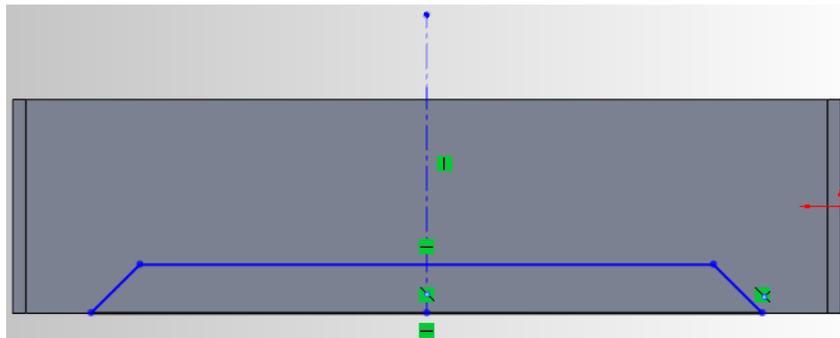


Figura 2.14. Posición del trapecio isósceles para la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se realizó una perforación de 35mm, como siguiente paso en la misma vista, se trazó cuatro circunferencias de 12.5mm de diámetro cuyos centros están separados en el caso de los dos más cercanos a una distancia de 12.5mm y de los otros dos sobrantes una distancia de 37.5mm con respecto al centro de masa del sólido como se muestra en la figura 2.15. Perforando lo suficiente para que traspase todo el sólido, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

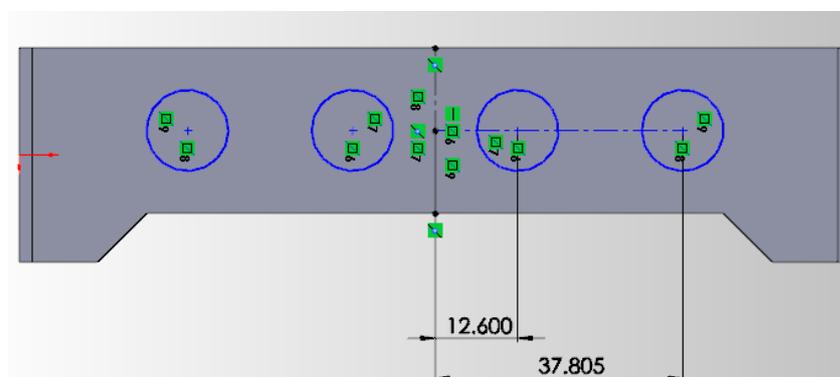


Figura 2.15. Distribución N.-1 de circunferencias de piezas de la Viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se repitió el mismo procedimiento en el reverso de la vista frontal del sólido y como es de esperar se generó los mismos resultados.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.16.

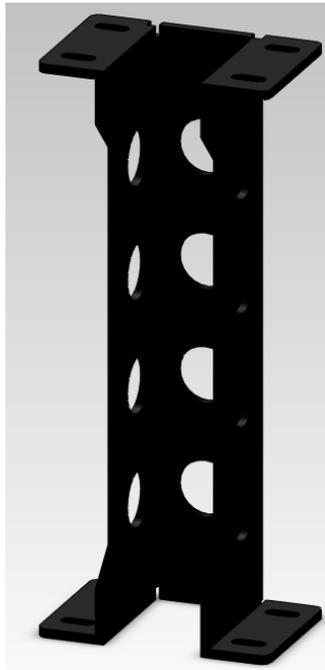


Figura 2.16. Modelo en SolidWorks de la viga de 127mm para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

e) Bases para servo motores

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 38x34mm y se extruyó al rectángulo un total de 2mm, a continuación en la parte superior del prisma se procedió a realizar circunferencias de manera simétrica respetando las proporciones apreciables en la figura 2.7. Con la singularidad de que se trazó una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, cuatro circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno, ocho circunferencias de 2mm de diámetro

separados 11mm del centro cada uno. Se realizó un corte de 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

En la vista superior, se dibujó en la superficie del prisma dos rectángulos que se encuentran en los bordes laterales del sólido cuyas dimensiones son de 2x34mm y se extruyó 8mm. En la vista frontal se trazó dos circunferencias de 1.25mm de diámetro, sus centros están separados 22mm, como muestra la figura 2.17.

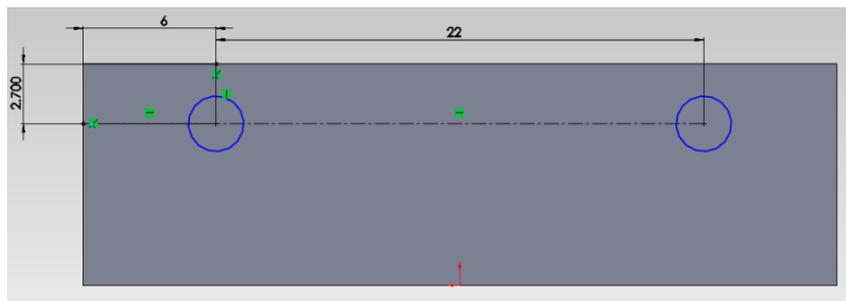


Figura 2.17. Distribución de circunferencias de la base de servo motor para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se realizó un corte sobre el prisma asegurándose que traspasen al otro lado del sólido, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color rojo oscuro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.18.

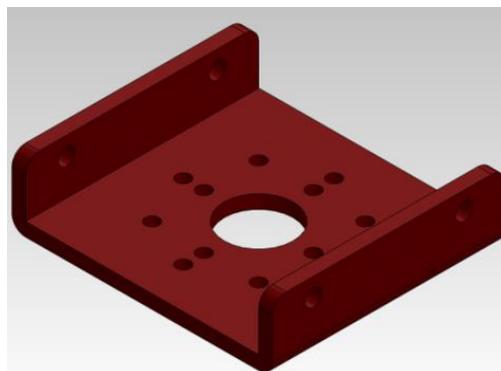


Figura 2.18. Modelo en SolidWorks de la base de servo motor para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

f) Mesa giratoria

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se trazó un cuadrado en el plano superior cuyo lado es de 114.3mm y se extruyó al cuadrado un total de 40mm. Se realizó un cascaron del sólido ubicando la perspectiva en la parte trasera del sólido, la cáscara tiene un espesor de 2mm, continuando en la misma vista, se colocó tres semi-óvalos en la parte superior, inferior e izquierda del cuadrado con dimensiones de 15x13mm y continuamente se trazó otro semi-óvalo interior de dimensiones 12.5x4mm, como muestra la figura 2.19. Finalmente se extruyó los semi-óvalos 2mm.

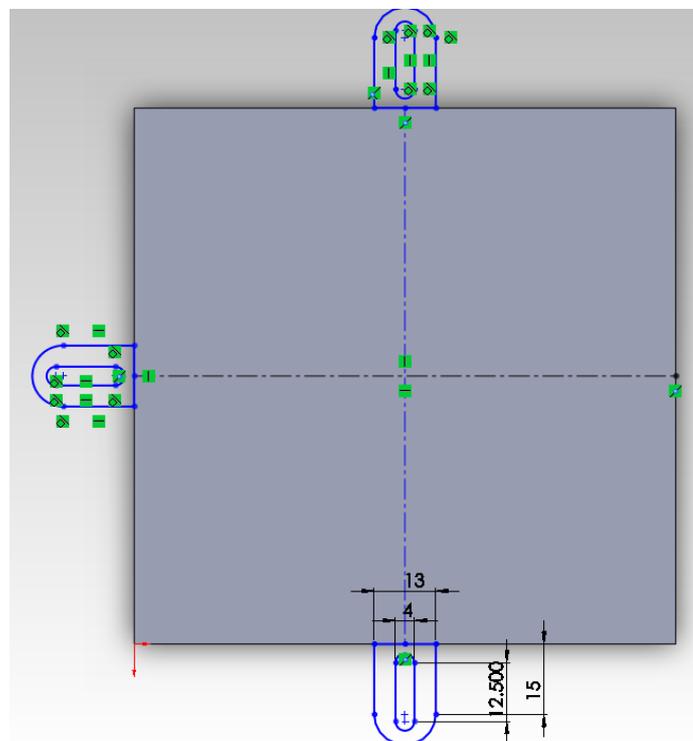


Figura 2.19. Distribución N.-1 de semi-óvalos de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

En la vista lateral del sólido se dibujó tres circunferencias de 15mm de diámetro, uno de ellos está ubicado en el centro de masa del rectángulo y los otros dos a 28mm del centro de la primera circunferencia como se ve en la figura 2.20. Se realizó un corte sobre el prisma asegurándose que traspasen al otro lado del sólido.

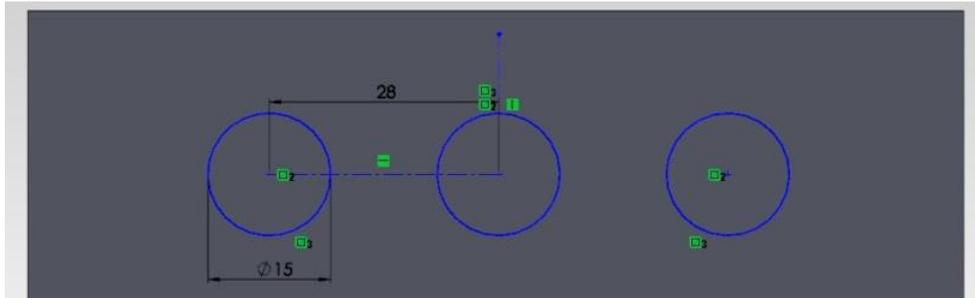


Figura 2.20. Distribución N.-1 de circunferencias de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Desde la vista frontal, se repitió el mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior.

En la vista superior se trazó un rectángulo cuyas medidas son 58x29mm y su centro está ubicado en un punto que dista en el eje X positivo por 16.85mm del centro del cuadrado, como muestra la figura 2.21.

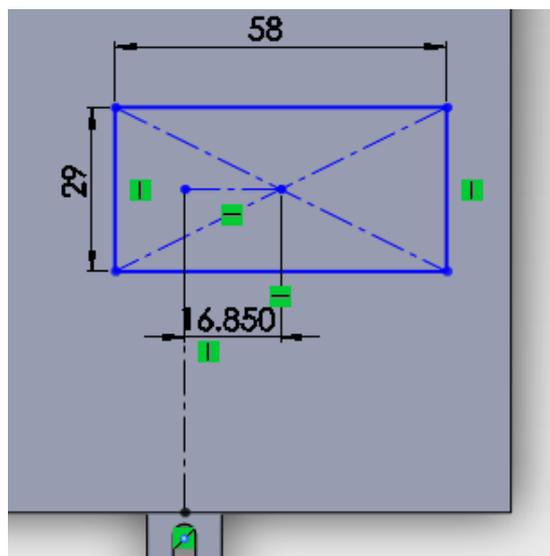


Figura 2.21. Rectángulo de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se realizó una perforación de 2mm sobre el sólido, ahora en el mismo plano se dibujó cuatro semi-óvalos cuyas dimensiones son 9.8x2.7mm ubicados como se muestra en la figura 2.22. Finalizó el proceso extruyendo los semi-óvalos 2mm.

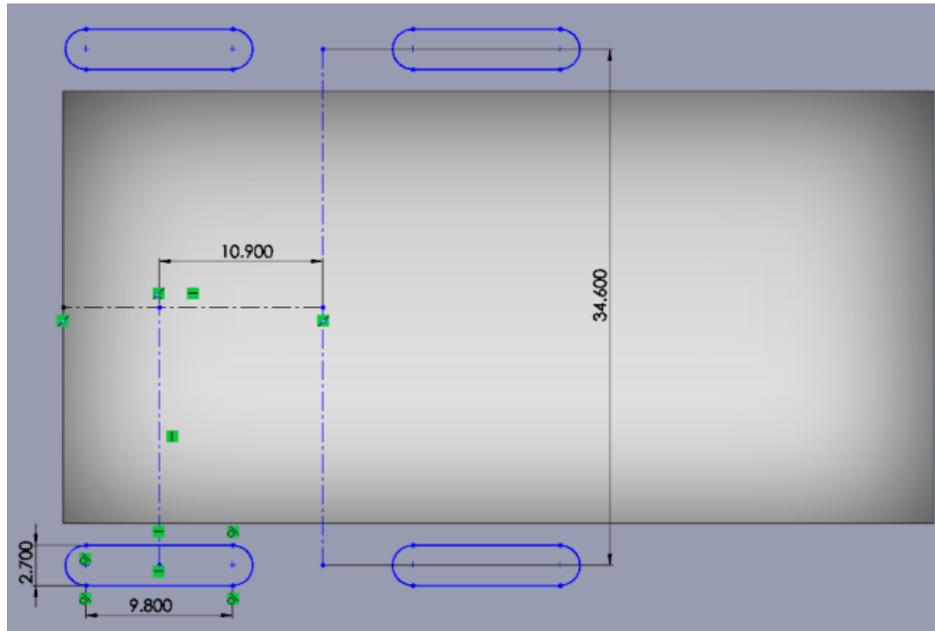


Figura 2.22. Distribución N.-2 de semi-óvalos de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se dibujó cuatro circunferencias de 24mm de diámetro que por facilidad y versatilidad la distribución de los mismos está asignadas como se muestra en la figura 2.23 después se perforó 2mm.

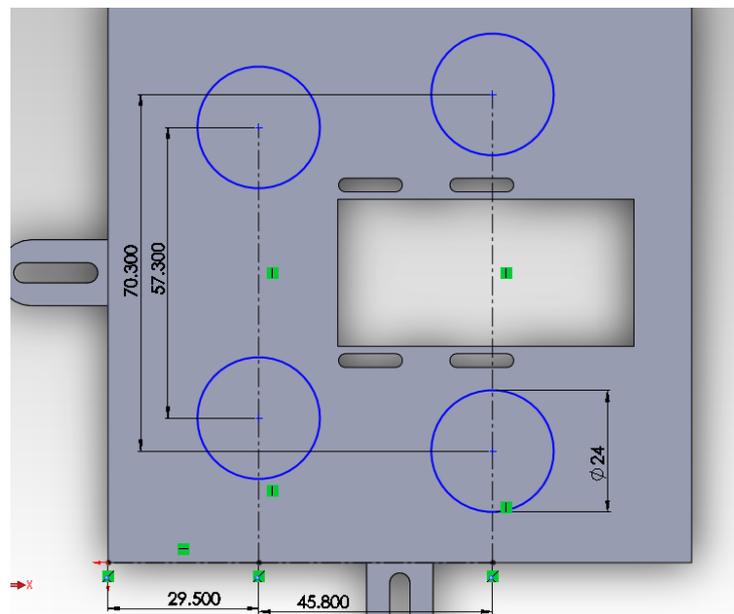


Figura 2.23, Distribución N.-21 de circunferencias de la mesa giratoria para el servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.24.

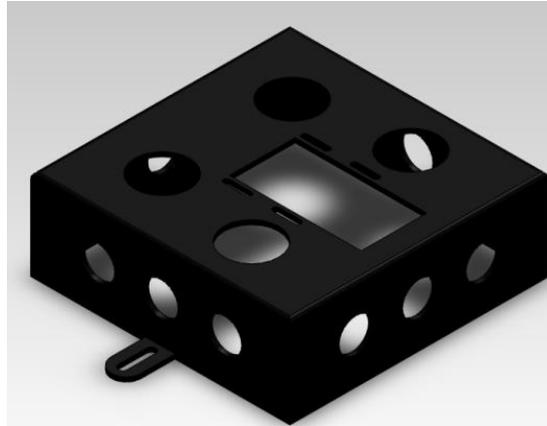


Figura 2.24. Modelo en SolidWorks de la mesa base.

Elaborado por Mena, J.

g) Disco de 113mm

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar una circunferencia en el plano superior cuyo diámetro es de 113mm, respetando la distribución que se muestra en la figura 2.9. Se trazó una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, cuatro circunferencias de 1mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno, ocho circunferencias de 2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno y se extruyó 2mm, se agregó color negro al sólido y se obtiene un resultado que se muestra la figura 2.25.

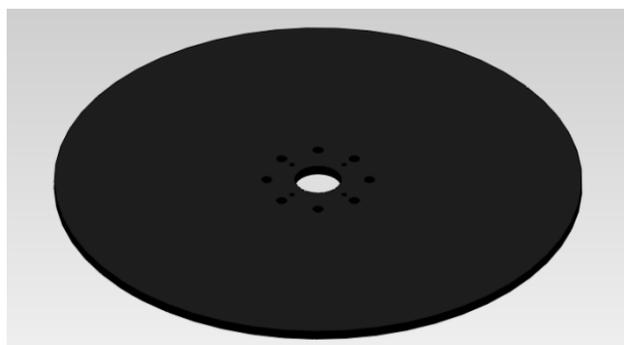


Figura 2.25. Modelo en SolidWorks del disco.

Elaborado por Mena, J.

2.1.2. Modelado de la piezas a utilizarse en el servo motor DYNAMIXEL MX-64T

Para los Servo Motores DYNAMIXEL MX-64T se tienen en total tres articulaciones, dos adaptadores de placa simple, una viga de 63.5mm, cinco bases para servo motor y dos adaptadores tipo L.

Los adaptadores de placa simple y las bases para servo motor para el Servo Motor DYNAMIXEL MX-64T son los mismos que se usan para el Servo Motor DYNAMIXEL MX-106T, la descripción de los mismos se encuentran en el capítulo 2.1.1 literal c) y e) respectivamente.

a) Articulaciones

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 33x51.3mm, se extruyó el rectángulo un total de 2mm, a continuación en la parte superior del prisma se procedió a realizar circunferencias de manera simétrica respetando las proporciones apreciables en la figura 2.1.

En la figura 2.3 se aprecia una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, diez circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno y finalmente ocho circunferencias de 2.2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno. Se realizó una corte de 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

En la vista superior se realizó dos rectángulos simétricos con respecto al centro de 10x3.5mm en la superficie del prisma, cuyos centros están a una distancia de 16.19mm del centro, se realizó chaflanes de 0.5mm en las esquinas. Se dibujó cuatro circunferencias simétricas de 2.7mm que están a 9.62mm del centro en la figura 2.26 y finalmente se cortó 2mm en el prisma dando como resultado perforaciones cilíndricas.

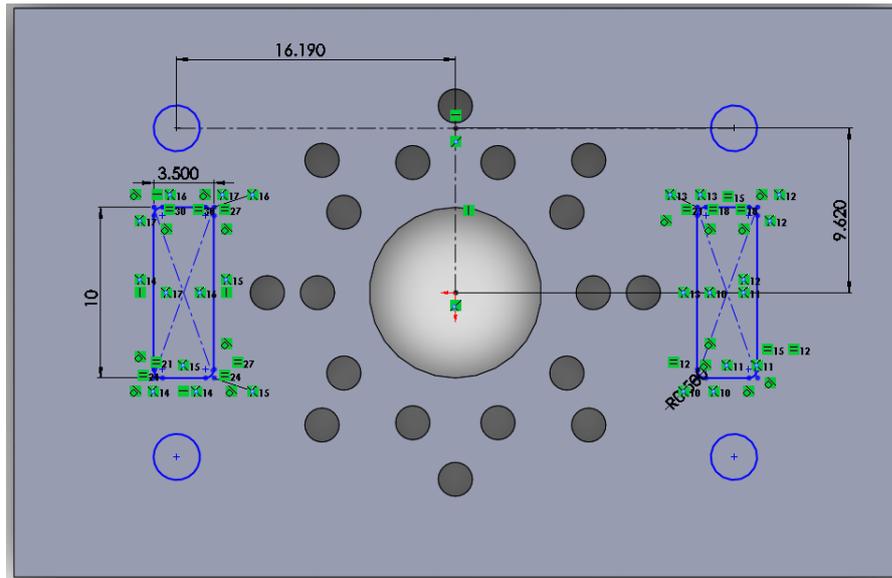


Figura 2.26. Distribución sobre el prisma de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX64T.

Elaborado por Mena, J.

Se ubicó dos rectángulos simétricos a la parte superior e inferior del prisma de 2x45.8mm y dos rectángulos simétricos a los laterales del prisma de 2x27.8mm, para los superiores se realizó una extrusión de 37mm y para los laterales una extrusión de 5mm.

En la vista frontal de la pieza y sobre la superficie de la extrusión de 37mm se dibujó dos rectángulo simétrico con respecto al centro de 5x15mm a una distancia de 9.5mm y 20.5mm de la base con respecto a sus centros, dos circunferencias de 1.5mm de diámetro que están 15mm distante de la base y a 8mm de distancia con respecto a la proyección paralela del centro de la base. Respetando la distribución establecida en la figura 2.1 se trazó las circunferencias mostradas en la figura 2.5 con la diferencia que se toma como centro a un punto que dista 36mm de la base. Se dibujó una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, tres circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno y finalmente cinco circunferencias de 2.2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno. Se realizó un corte que atravesó las dos caras de 37mm, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

Finalmente se agregó Chaflanes de 2mm en las esquinas salientes del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.27.

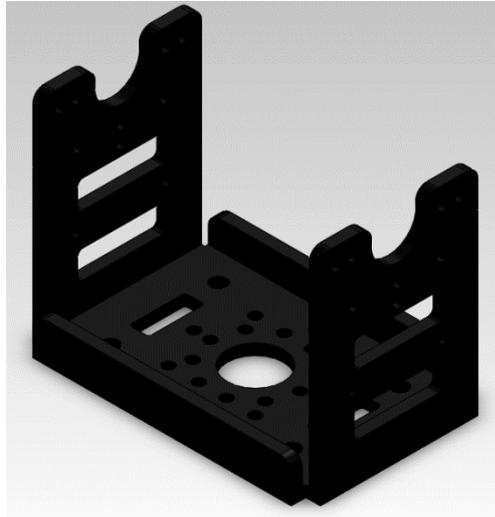


Figura 2.27. Modelo en SolidWorks de la articulación para el servo motor DYNAMIXEL MX64T.

Elaborado por Mena, J.

b) Viga de 63.5mm

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 33x25mm y en acto seguido se extruyó al rectángulo un total de 63.5mm. En la vista frontal del sólido se creó un rectángulo cuyas medidas simétricas al centro del sólido son de 21.5x63.5mm y finalmente una perforación de 31mm.

En la vista lateral del sólido se dibujó dos rectángulos ubicados en la parte superior e inferior del cuyas medidas son de 2x33mm, se extruyó a los dos rectángulos un total de 13mm. Como siguiente paso se realizó el mismo procedimiento en el lado opuesto de la vista lateral.

En la vista superior se trazó cuatro semi-óvalos de tal forma que sean concéntricos con respecto a las cuatro circunferencias de 3mm que se muestran en la figura 2.7 y de medidas 3.2x7.5mm, se realizó perforaciones que llegan hasta la base del sólido.

En la vista lateral se realizó un trapecio isósceles de 33.5mm de base mayor, 17.5mm de base menor y altura de 8mm en la posición que se muestra en la figura 2.14. Se perforó 35mm, como siguiente paso en la vista lateral se dibujó dos circunferencias de 13mm de diámetro cuyos centros están separados 12.5mm, se perforó lo suficiente para que traspase todo el sólido.

Se repitió el mismo procedimiento en el reverso de la vista frontal del sólido y se obtuvo los mismos resultados ya descritos.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.28.

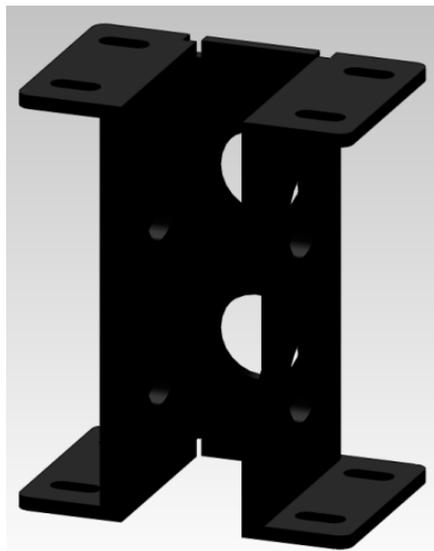


Figura 2.28. Modelo en SolidWorks de la viga de 63.5mm para el servo motor DYNAMIXEL MX64T.

Elaborado por Mena, J.

c) Adaptador tipo L

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza utilizando un pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 15x32mm y en acto seguido se extruyó al rectángulo un total de 2mm. En la vista frontal del sólido se creó un

rectángulo pegado al extremo izquierdo cuyas medidas son de 2x32mm, finalmente se realizó una perforación de 40mm.

En la vista superior se trazó dos semi-óvalos de tal forma que sean concéntricos con respecto a las dos circunferencias de 2.7mm y de medidas 1.6x6.8mm, como se ve en la figura 2.29, se realizó perforaciones que llegan hasta la base del sólido.

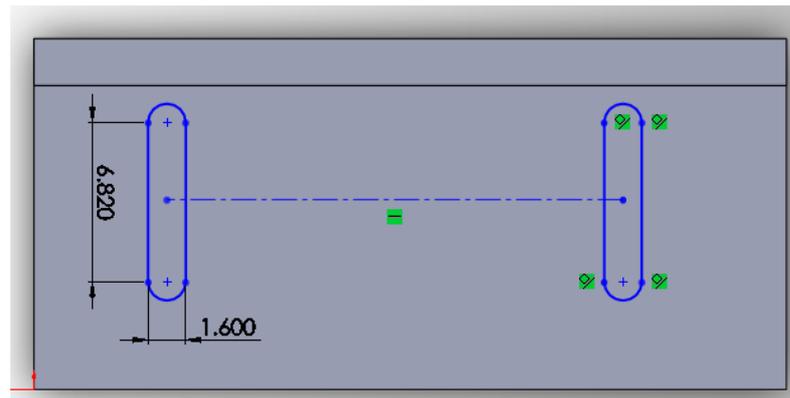


Figura 2.29. Distribución N.-1 de semi-óvalos para la adaptadora tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX-64T.

Elaborado por Mena, J.

En la vista frontal se trazó dos semi-óvalos de tal forma que sean concéntricos con respecto a las dos circunferencias de 2mm a 11mm del centro que se muestran en la figura 2.7 y de medidas 1.6x6.8mm, como se ve en la figura 2.30, se realizó perforaciones de 2mm sobre el sólido.

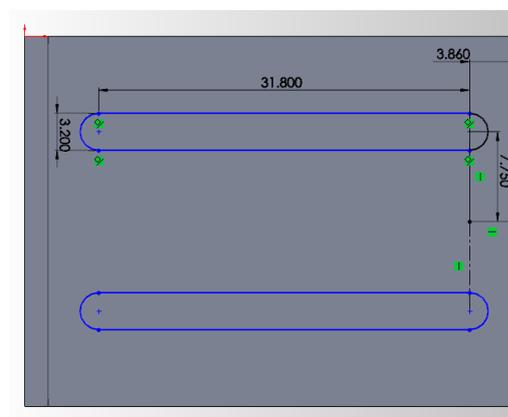


Figura 2.30. Distribución N.-2 de semi-óvalos para el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX-64T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.31.

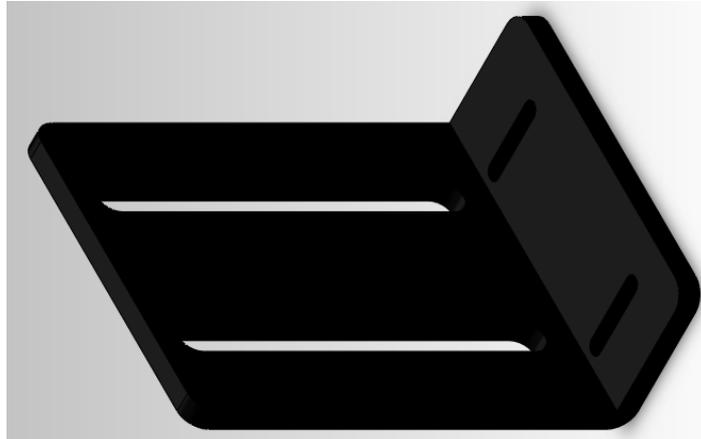


Figura 2.31. Modelo en SolidWorks para el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX64T.

Elaborado por Mena, J.

2.1.3. Modelado de la piezas a utilizarse en el servo motor DYNAMIXEL MX-28T

Para los servos motores DYNAMIXEL MX-28T se tienen en total dos articulaciones para pinza, una base para servo motor reducida y un juego de pinzas.

a) Articulación para pinza

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 45x25mm y en acto seguido se trazó con líneas auxiliares un cuadrado y un rectángulo concéntricos con el centro de maza cuyas medidas en el caso del cuadrado es 15mm de lado y en el caso del rectángulo 33x15mm, en los extremos del cuadrado se trazó cuatro circunferencias de 3.2mm de diámetro, sobre el punto medio, en sus líneas se dibujó circunferencias de 2.4mm, sobre los extremos del rectángulo circunferencias de 3mm de diámetro como muestra la figura 2.32, se extruyó el rectángulo un total de 2mm.

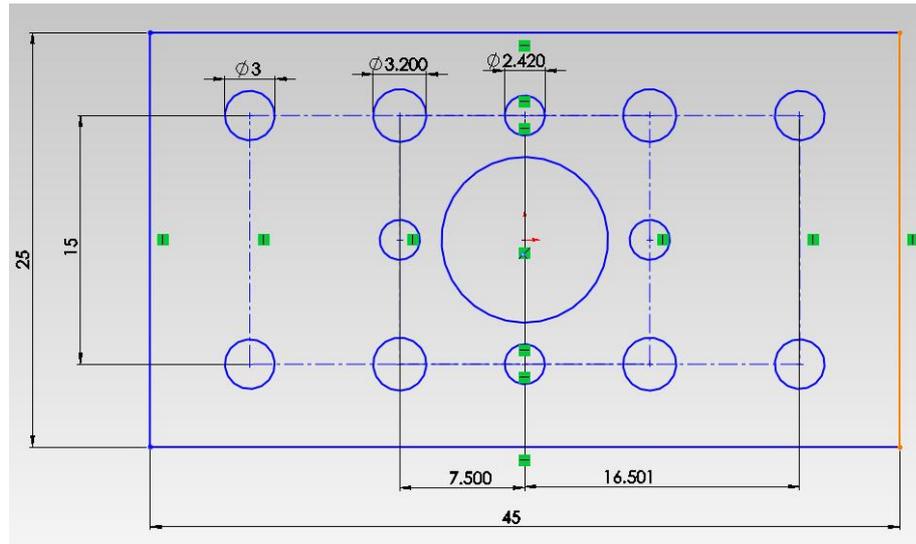


Figura 2.32. Distribución de circunferencias N.-1 de la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

En la vista lateral y sobre la superficie del sólido se trazó la figura geométrica que se muestra en la figura 2.33. Para la elaboración de las circunferencias que se encuentra en la parte superior, se tomó en cuenta la proporción que se observa en la figura 2.2.

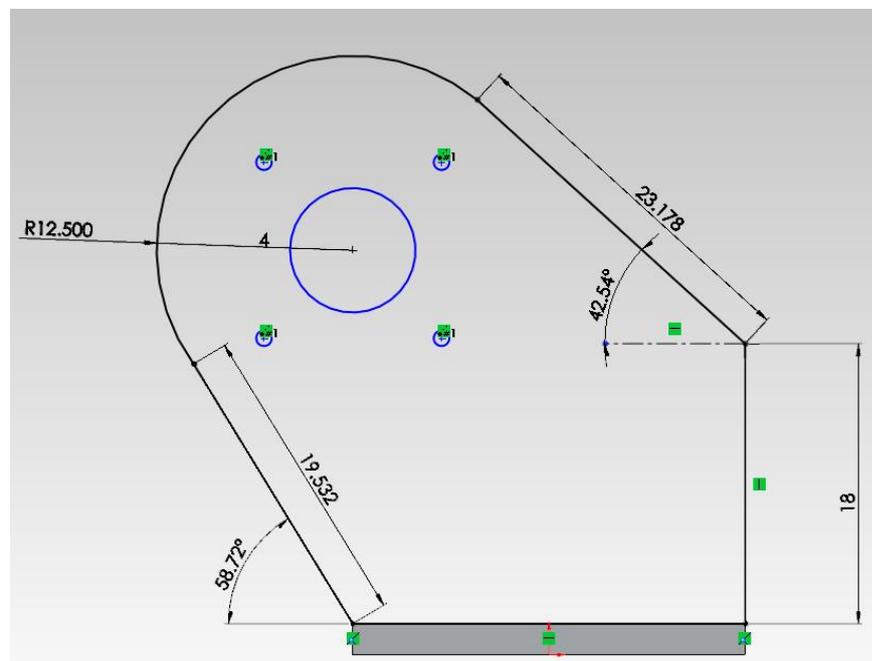


Figura 2.33. Figura geométrica de la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

La circunferencia del centro que es concéntrica con la circunferencia de 33mm de diámetro que se muestra en la figura 2.33 con un radio de 5mm, las cuatro circunferencias están a una distancia de 8mm a este centro y tienen un diámetro de 1mm y un rectángulo sobre la base simétrico de dimensiones 4.6x9.4mm. Se extruyó un sólido de 45mm y se trazó en la vista frontal un rectángulo de 41x36mm sobre la superficie de la base y se cortó el excedente del sólido como muestra en la figura 2.34.

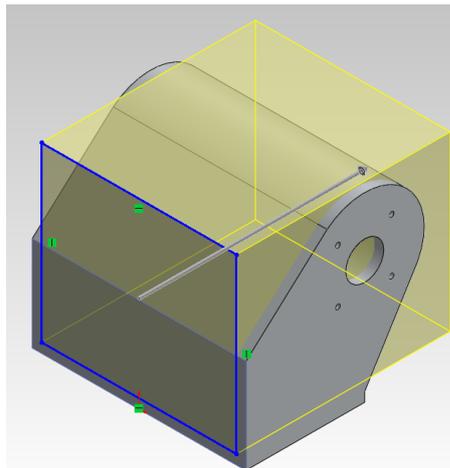


Figura 2.34. Perforación de la articulación para pinza del Servo Motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Con el asistente de taladrado, se realizó perforaciones de avellanado M2, siendo concéntricos con los círculos que se muestran en la figura 2.35.

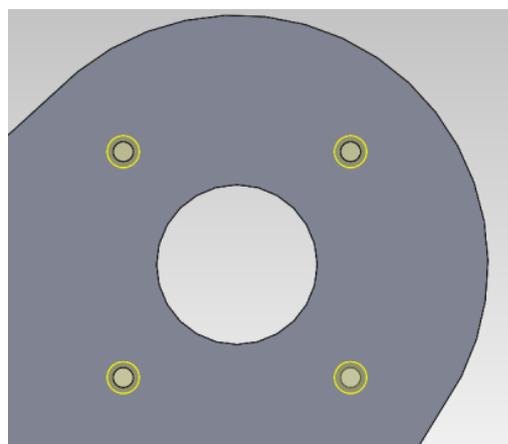


Figura 2.35. Distribución de taladrado de piezas para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se agregó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color plateado para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que se observa en la figura 2.36.

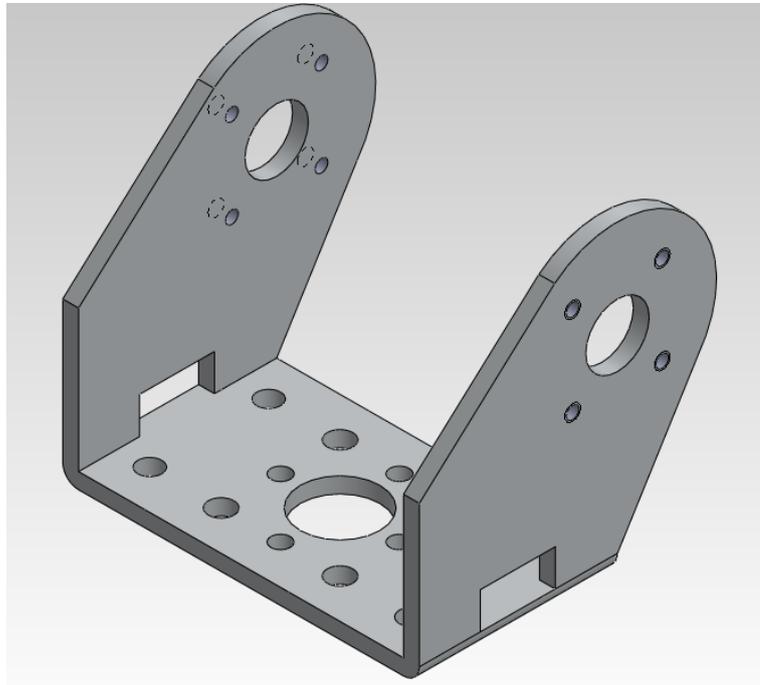


Figura 2.36. Modelo en SolidWorks para las articulaciones para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

b) Base para servo motor reducida

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 30x34mm y se extruyó al rectángulo un total de 2mm, en la parte superior del prisma se procede a realizar circunferencias de manera simétrica respetando las proporciones apreciables en la figura 2.2. Con la singularidad de que se trazó una circunferencia en el centro de 10mm de diámetro, cuatro circunferencias de 2mm de diámetro separados a una distancia de 8mm del centro cada uno, ocho circunferencias de 2mm de diámetro separados 11mm del centro cada uno. Se realizó un corte de 2mm sobre el prisma, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

En la vista superior se dibujó en la superficie del prisma dos rectángulos que se encuentran en los bordes laterales del sólido cuyas dimensiones son de 2x34mm y se extruyó 8mm. En la vista frontal se trazó dos circunferencias de 1.25mm de diámetro y sus centros están separados 22mm.

Se realizó un corte sobre el prisma que traspasó todo el sólido, dando como resultado perforaciones cilíndricas.

Finalmente se asignó chaflanes de 2mm en las esquinas del sólido y se asignó un tinte de color rojo oscuro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.37.

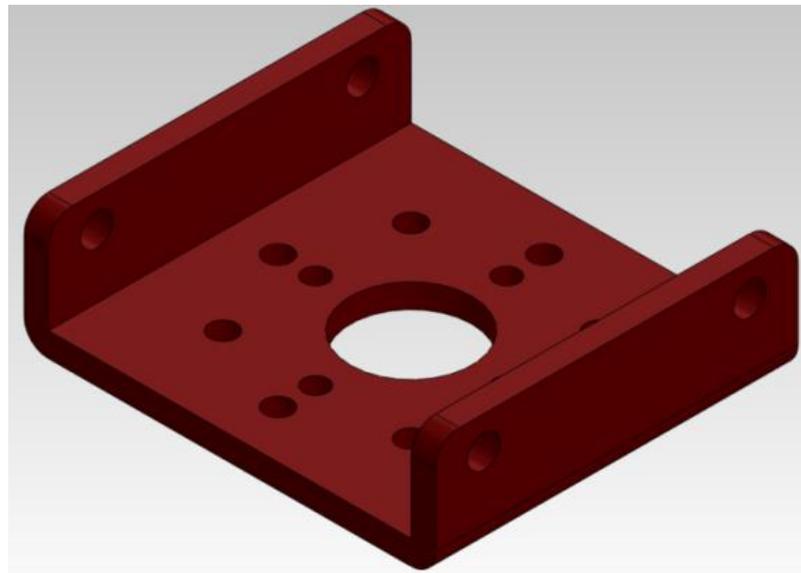


Figura 2.37. Modelo en SolidWorks de la base de servo motor reducida para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

c) Pinzas

Se realizó la medición del ancho y alto de la pieza con un medidor de longitudes tipo pie de rey digital, en el programa SolidWorks se procedió a trazar un rectángulo en el plano superior cuyas medidas son 45x20mm y en acto seguido se extruyó al rectángulo un total de 2mm. En la misma vista se trazó un rectángulo de 15mm de base y alto en la posición que marca la figura 2.38 y finalmente se extruyó 2mm.

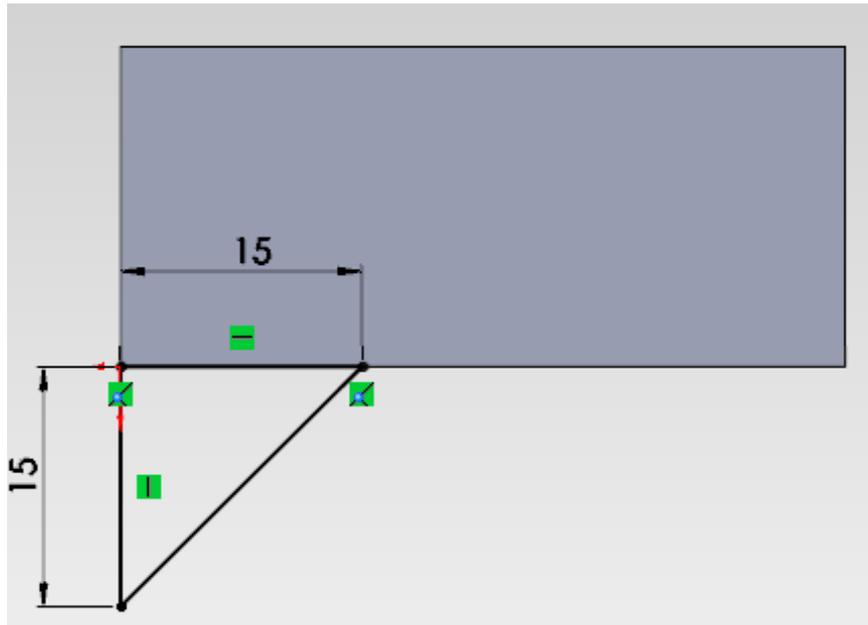


Figura 2.38. Figura Geométrica N.-1 de la pinza para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

En la vista frontal se dibujó la forma geométrica que se muestra en la figura 2.39. Después, se extruyó un total de 22mm.

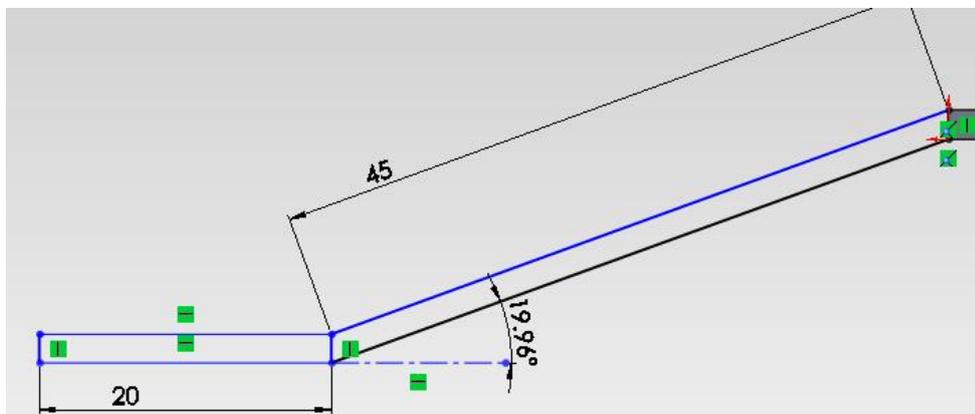


Figura 2.39. Figura Geométrica N.-2 de la pinza para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

En la vista superior se dibujó dos semi-óvalos de dimensiones 3x10.6mm separados 15mm y como se muestra en la figura 2.40 se realizó perforación.

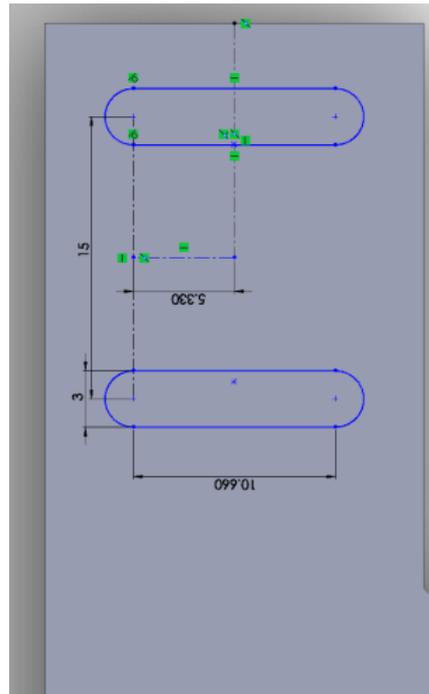


Figura 2.40. Distribución de semi-óvalos de la Pinza para el Servo Motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Finalmente se asignó un tinte de color negro para asemejarse con el modelo real. Teniendo como resultado lo que muestra la figura 2.41.

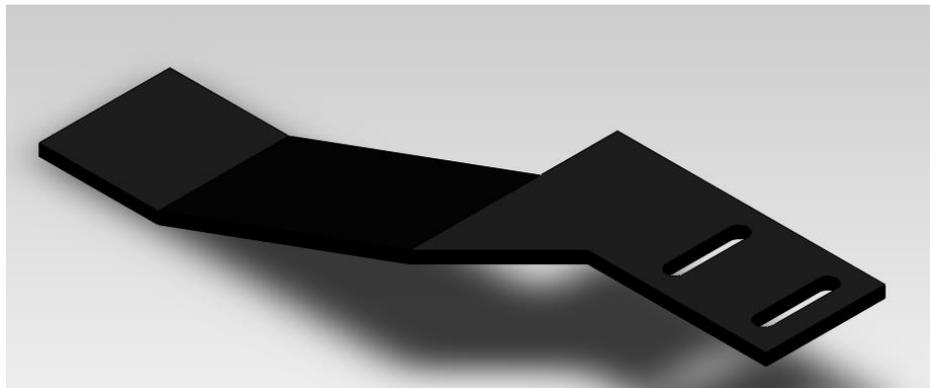


Figura 2.41. Modelo en SolidWorks de la pinza para motor reducida para el servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

2.2. MORFOGENÉISIS

Utilizando el software SolidThinking Inspire 9.0, con el cual aplicando fuerzas o momentos ya sean cortantes o flexionantes para cada una de las

piezas que conforman la estructura, se redujo la masa de cada uno sin afectar a las propiedades mecánicas del objeto.

Para este procedimiento se aplicó cargas de 1000N o momentos de 10000 N.cm en intervalos del 5% hasta un máximo del 50% de la masa total del objeto, el material a usarse es Aluminio (2024-T3). Como todo programa de ingeniería es una herramienta que facilita la toma de decisiones, dado que el programa busca idealizar las órdenes asignadas por el usuario en todos los casos el devastado sugerido por el programa se vuelve totalmente referencial o inclusive nulo.

Es por eso que para el análisis de cada sólido se generó una tabla de contenido donde se muestra la masa que se retiró y el porcentaje de sólido, al final se escogió el optimizado más representativo. Mediante el programa se obtuvo el peso de cada una de las piezas en gramos, los cuales se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de masa para cada Pieza del Brazo Robótico CrustCrawler.

| Nombre | Masa(gr) |
|----------------------------------|-----------------|
| Adaptador de Placa Simple | 9 |
| Adaptador de Placa Doble | 18 |
| Viga de 127mm | 56 |
| Viga de 63.5mm | 47 |
| Adaptador Tipo L | 9 |
| Articulación | 22 |
| Articulación para pinza | 15 |
| Base para Servo Motores | 10 |

Elaborado por Mena, J

2.2.1. Adaptador de placa simple

Para el adaptador de placa simple se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador de Placa Simple.

| % | masa(gr) |
|-----------|-----------------|
| 5 | 1 |
| 10 | 1 |
| 15 | 1 |
| 20 | 2 |
| 25 | 2 |
| 30 | 3 |
| 35 | 3 |
| 40 | 4 |
| 45 | 4 |
| 50 | 5 |

Elaborado por Mena, J.

Se analizó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa para el adaptador de placa simple el cual corresponde al 45% de optimización como se muestra en la figura 2.42.

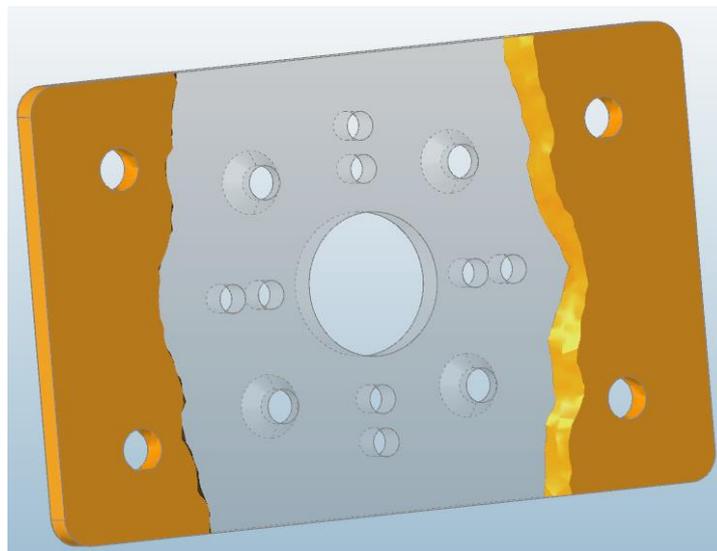


Figura 2.42. Optimización del 45% del Adaptador de Placa Simple.

Elaborado por Mena, J.

2.2.2. Adaptador de placa doble

Para el adaptador de placa doble se ubicó los soportes en las perforaciones de la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido

desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador de Placa Doble

| % | masa(gr) |
|----|----------|
| 5 | 1 |
| 10 | 2 |
| 15 | 3 |
| 20 | 5 |
| 25 | 6 |
| 30 | 6 |
| 35 | 7 |
| 40 | 7 |
| 45 | 8 |
| 50 | 9 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa para el Adaptador de Placa Simple el cual corresponde al 50% de optimización como se muestra en la figura 2.43.

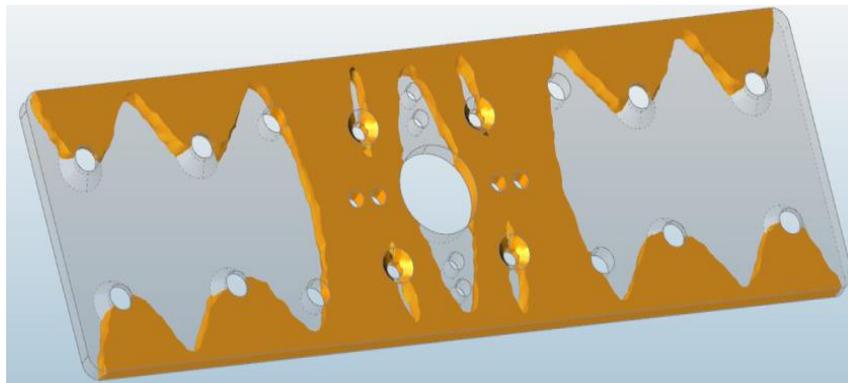


Figura 2.43. Optimización del 50% para el Adaptador de Placa Doble.

Elaborado por Mena, J.

2.2.3. Viga de 127mm

Para la Viga de 127mm se ubicó los soportes en las perforaciones del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para la Viga de 127mm.

| % | masa(g) |
|----|---------|
| 5 | 3 |
| 10 | 5 |
| 15 | 8 |
| 20 | 11 |
| 25 | 14 |
| 30 | 17 |
| 35 | 20 |
| 40 | 22 |
| 45 | 25 |
| 50 | 28 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa para la Viga de 127mm el cual corresponde al 50% de optimización como se muestra en la figura 2.44.

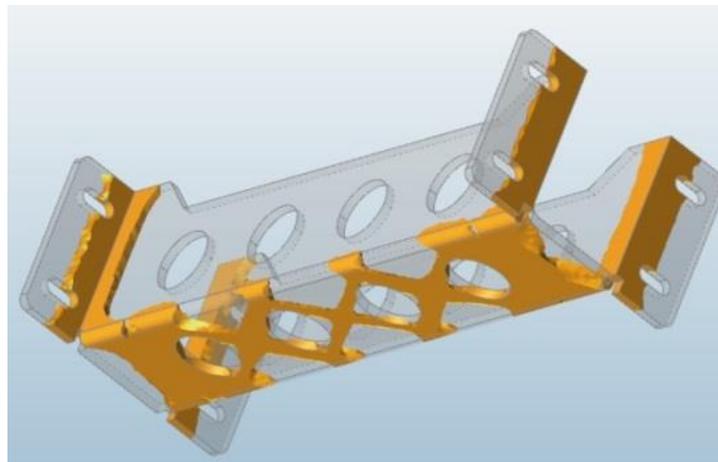


Figura 2.44. Optimización del 30% para la Viga de 127mm.

Elaborado por Mena, J.

2.2.4. Viga de 63.5mm

Para la Viga de 63.5mm se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para la Viga de 63.5mm.

| % | masa(g) |
|-----------|----------------|
| 5 | 2 |
| 10 | 5 |
| 15 | 7 |
| 20 | 9 |
| 25 | 12 |
| 30 | 14 |
| 35 | 16 |
| 40 | 19 |
| 45 | 21 |
| 50 | 24 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa para la Viga de 63.5mm el cual corresponde al 45% de optimización como se muestra en la figura 2.45.

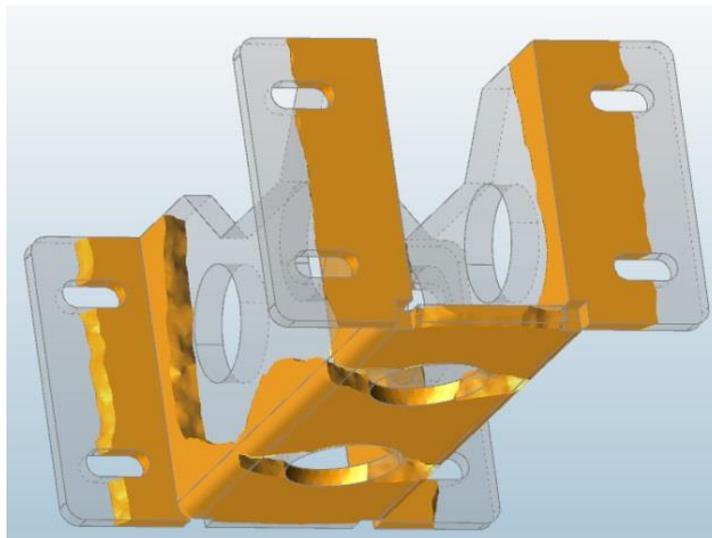


Figura 2.45. Optimización del 45% para la Viga de 63.5mm.

Elaborado por Mena, J.

2.2.5. Adaptador tipo L

Para el Adaptador Tipo L se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo para el Adaptador Tipo L.

| % | masa(g) |
|----|---------|
| 5 | 1 |
| 10 | 1 |
| 15 | 1 |
| 20 | 1 |
| 25 | 2 |
| 30 | 2 |
| 35 | 3 |
| 40 | 4 |
| 45 | 4 |
| 50 | 5 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa Adaptador Tipo L el cual corresponde al 25% de optimización como se muestra en la Figura 2.46.

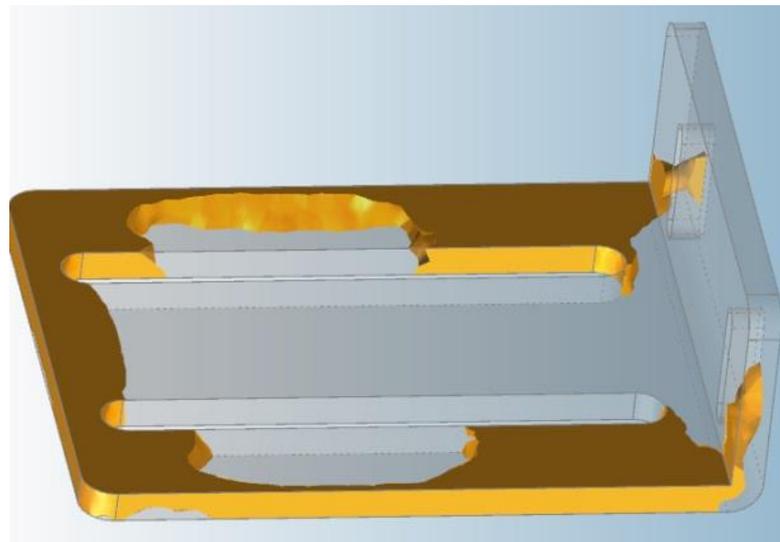


Figura 2.46. Optimización del 25% para el Adaptador Tipo L.

Elaborado por Mena, J.

2.2.6. Articulación para pinza

Para el Articulación para Pinza se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Articulación para Pinza.

| % | masa(g) |
|----|---------|
| 5 | 1 |
| 10 | 2 |
| 15 | 2 |
| 20 | 3 |
| 25 | 4 |
| 30 | 5 |
| 35 | 5 |
| 40 | 6 |
| 45 | 7 |
| 50 | 8 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa de la Articulación para Pinza el cual corresponde al 50% de optimización como se muestra en la figura 2.47.

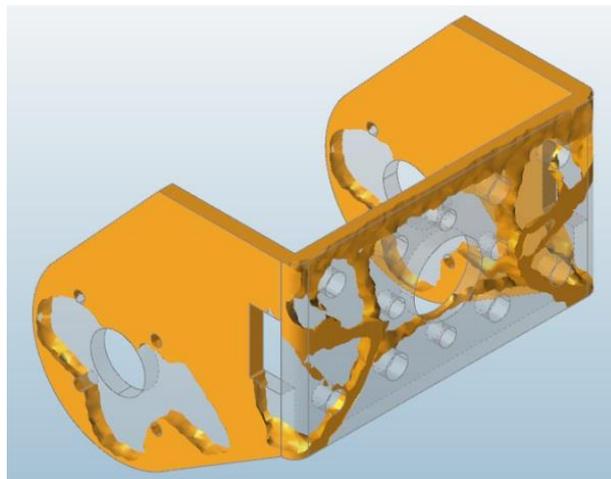


Figura 2.47. Optimización del 50% para la Articulación de Pinza.

Elaborado por Mena, J.

2.2.7. Articulaciones

Para la articulación se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Articulación.

| % | masa(g) |
|-----------|----------------|
| 5 | 1 |
| 10 | 2 |
| 15 | 3 |
| 20 | 4 |
| 25 | 6 |
| 30 | 7 |
| 35 | 8 |
| 40 | 9 |
| 45 | 10 |
| 50 | 11 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa de la Articulación el cual corresponde al 30% de optimización como se muestra en la figura 2.48.

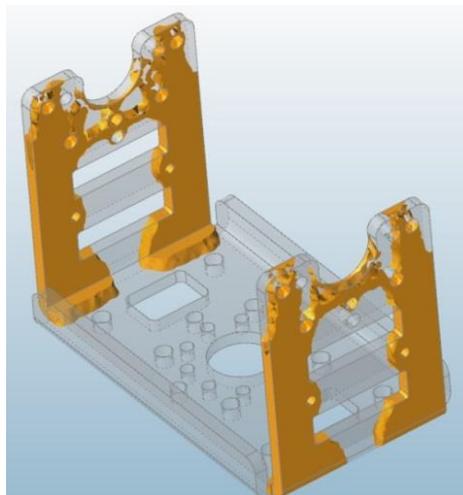


Figura 2.48. Optimización del 30% para la Articulación.

Elaborado por Mena, J.

2.2.8. Bases para servo motor

Para la bases para servo motor se ubicó los soportes en la cara inferior del objeto, momentos en los laterales con valores de 1000N.cm y cargas de 1000N, se procedió a optimizar el sólido desde el 5% hasta el 50% obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Porcentaje de masa reducido por cada intervalo de la Bases para Servo Motor.

| % | masa(g) |
|-----------|----------------|
| 5 | 1 |
| 10 | 1 |
| 15 | 2 |
| 20 | 2 |
| 25 | 3 |
| 30 | 3 |
| 35 | 4 |
| 40 | 4 |
| 45 | 5 |
| 50 | 5 |

Elaborado por Mena, J.

Se observó cada uno de los casos y se seleccionó la optimización más representativa de la Bases para Servo Motor el cual corresponde al 50% de optimización como muestra la figura 2.49.

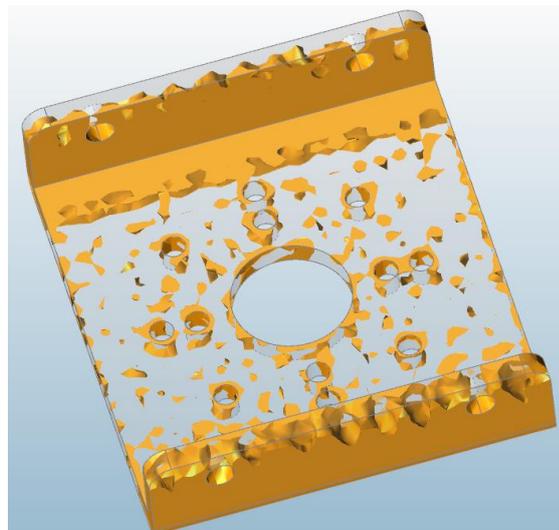


Figura 2.49. Optimización del 50% para la Bases para Servo Motor.

Elaborado por Mena, J.

2.3. CINEMÁTICA DEL ROBOT

Para el análisis cinemático del robot se tomó en cuenta la configuración que se muestra en la figura 1.3 y lo descrito en el capítulo 1.6.3, para el brazo robótico CrustCrawler se desarrolló el cuadro de parámetros Denavit

Hartenberg (D&H) de donde se presenta un total de seis eslabones y articulaciones como se muestra en la figura 2.50.

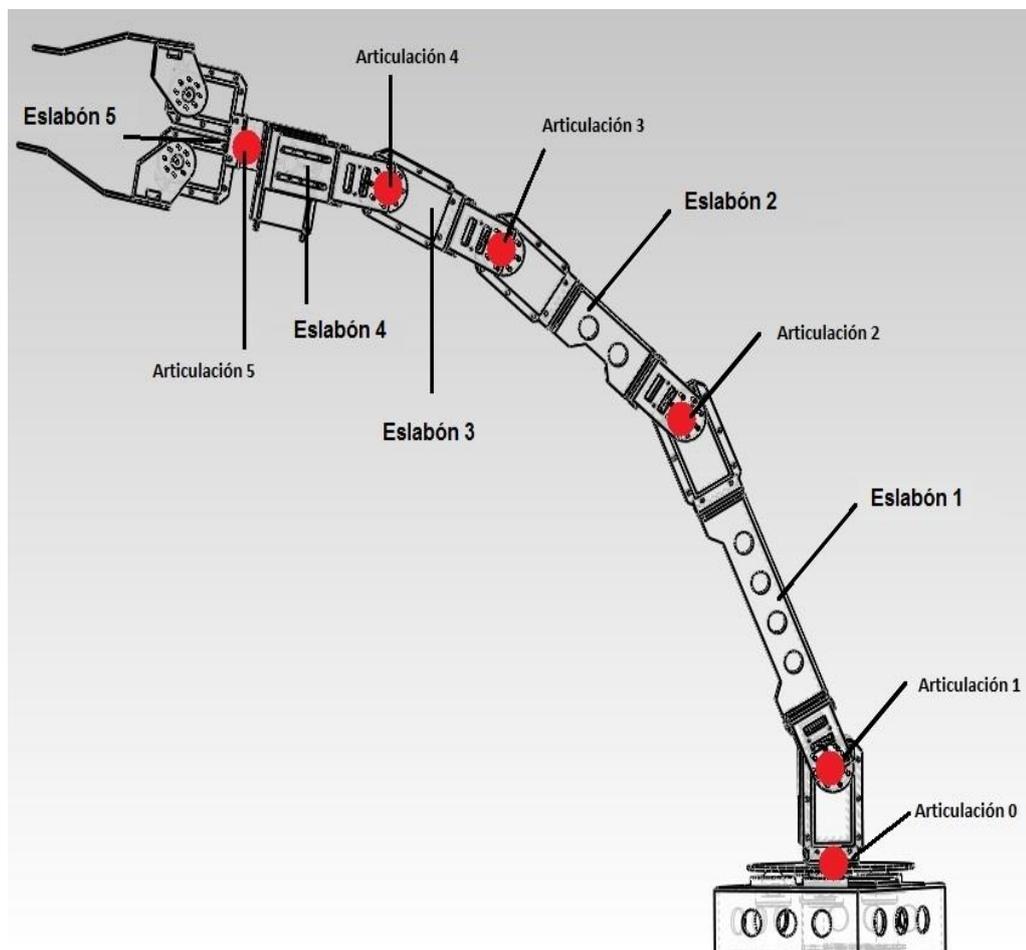


Figura 2.50. Articulaciones y eslabones del Brazo Robótico CrustCrawler.

Elaborado por Mena, J.

De la figura 2.50 aplicando el criterio de Grübler-Kutzbach, se usó la ecuación 1.2 para obtener de esta forma la movilidad del mecanismo y las filas de la tabla D&H para eso se usó los valores que se muestran a continuación:

$$n = 6$$

$$j_1 = 4$$

$$j_2 = 2$$

Dando como resultado un valor para m de 5, lo cual implica que la tabla D&H tendrá cinco filas. Se realizó la tabla D&H para los ángulos de giro y las distancias que recorre el brazo robótico dando como resultado los datos que se ven en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Tabla D&H del Brazo Robótico CrustCrawler.

| i | α_{i-1} | a_{i-1} | θ_i | d_i |
|-----|----------------|-----------|------------|-------|
| 1 | α_0 | 0 | θ_1 | 0 |
| 2 | 0 | a_1 | θ_2 | 0 |
| 3 | 0 | a_2 | θ_3 | 0 |
| 4 | 0 | a_3 | θ_4 | 0 |
| 5 | α_5 | 0 | 0 | 0 |

Elaborado por Mena, J.

De la tabla se observó que:

- La articulación 1 y 5 son capaces de girar con respecto al eje X mientras que las otras tres exclusivamente lo hacen con respecto al eje Z.
- La articulación 5 no se desplaza sobre el eje Z y adopta el ángulo y desplazamiento en el eje X de la Articulación 4.

Con las variables y constantes del sistema se procedió a armar la matriz que representará el movimiento cinemático del robot, para ello se usó el ToolBox de Matlab, en el programa para el manipulador PUMA560 en el cual se puede modificar los valores de maza, velocidad, distancias y ángulos de giro.

2.3.1. Peso de los elementos

De las tabla 1.1, tabla 1.2 y tabla 1.3 se obtuvo los valores de peso y velocidades de los motores y en conjunto con los valores que se describen en la tabla 2.1 se determinó el peso de cada una de los cinco eslabones los cuales se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Componentes y peso de cada elemento del brazo Robótico CrustCrawler.

| Eslabón | Componentes | Masa(gr) | Dist (mm) |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | Articulación (2), Viga de 127mm, Adaptador de Placa Doble, Motor DYNAMIXEL MX106T, Base para Servo Motor, Adaptador Placa Simple. | 290 | 237 |
| 2 | Articulación, Viga de 63.5mm, Adaptador de Placa Simple (2), Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor. | 223 | 172.5 |
| 3 | Articulación, Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor. | 158 | 115 |
| 4 | Articulación, Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor (2), Adaptador Tipo L (2). | 184 | 76 |
| 5 | Articulación para Pinza (2), Motor DYNAMIXEL MX28T, Base para Servo Motor. | 112 | 0 |

Elaborado por Mena, J.

2.3.2. Ángulos de giro

Tanto la articulación 0 como la articulación 5 pueden girar indefinidamente y para determinar los ángulos permisibles del resto de articulaciones se tomó en cuenta el peso que pueden soportar los motores y la disposición mecánica de cada eslabón. Para mejor comprensión se divide los eslabones del robot en cuatro segmentos.

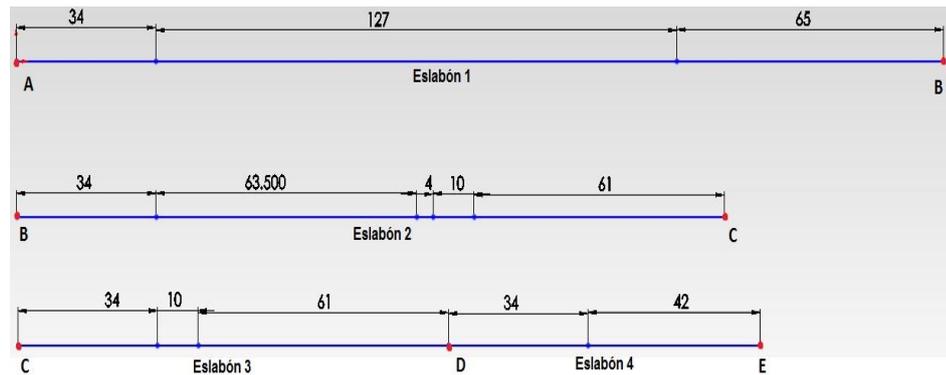


Figura 2.51. Diagramas de cuerpo libre de los Eslabones del Brazo Robótico CrustCrawler.

Elaborado por Mena, J.

En la figura 2.51 se aprecia el diagrama de cuerpo libre de cada eslabón del sistema observado desde su vista frontal y el cual está descrito de la siguiente manera:

- El segmento A-B representa al primer eslabón y cada uno de sus componentes.
- El segmento B-C representa al segundo eslabón y cada uno de sus componentes.
- El segmento C-D representa al tercer eslabón y cada uno de sus componentes.
- El segmento D-E representa al cuarto eslabón y cada uno de sus componentes.
- El punto E representa al quinto eslabón y cada uno de sus componentes.

De la tabla 1.2 y tabla 1.3 se obtiene el torque máximo de los motores DYNAMIXEL MX64T y DYNAMIXEL MX106T, usando las distancias de cada eslabón se puede determinar el peso permisible de cada motor reemplazando los valores en la ecuación 2.1.

$$F = \frac{T}{d} \text{ Ec. 2.1}$$

En donde:

- F es la fuerza del motor
- T es el Torque de los motores
- d es la distancia donde se aplica la fuerza

Remplazando en la ecuación se obtuvo los siguientes resultados:

- Para el segmento A-E los dos motores DYNAMIXEL MX106T ejercen una fuerza de 33.2N.
- Para el segmento B-E el motor DYNAMIXEL MX64T ejercen una fuerza de 20N.
- Para el segmento C-E el motor DYNAMIXEL MX64T ejercen una fuerza de 38.4N.
- Para el segmento D-E el motor DYNAMIXEL MX64T ejercen una fuerza de 96N.

Se colocó el peso de cada uno de los elementos descritos en cada segmento, usando la tabla 2.1 y la figura 2.51, utilizando la ecuación 2.2 y ecuación 2.3 se determinó que los motores son capaces de levantar cada uno de los segmentos, conocer la masa adicional que pueden cargar y linealmente el rendimiento de cada motor para realizar el trabajo.

$$F_s = F_m - \sum F \text{ Ec. 2.2}$$

$$X_m = \frac{F_s}{F_m} \times 100 \text{ Ec. 2.3}$$

En donde:

- F_s es la fuerza sobrante del motor.
- F_m es la fuerza neta del segmento que ejerce el motor.
- F es la sumatoria de todos los pesos de cada segmento.
- X_m es el rendimiento lineal de los motores.

Dividiendo cada F_s en cada segmento para la constante de la gravedad y así se obtiene la masa adicional permisible de cada segmento, para toda operación matemática se usó el sistema MKS, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.12 que está dividida por segmentos.

Tabla 2.12. Fuerza, masa y rendimiento por segmentos del brazo robótico CrustCrawler.

| Segmento | Fuerza(N) | Masa(Kg) | Rendimiento (%) |
|----------|-----------|----------|-----------------|
| A-E | 23.72 | 2.42 | 28.54 |
| B-E | 13.36 | 1.36 | 33.17 |
| C-E | 33.75 | 3.44 | 11.64 |
| D-E | 93.09 | 9.49 | 3.02 |

Elaborado por Mena, J.

Teniendo en cuenta que cada segmento del brazo robótico puede cargar libremente al robot, entonces se sigue, que no existe limitaciones en cuanto al ángulo permisible de cada motor, por lo cual se asignó una limitación referencial de 90° a cada articulación, por la facilidad que ejerce para el análisis.

2.3.3. Modelado cinemático

Para el modelado del brazo robótico se usó como referencia el archivo de MATLAB con el nombre de Puma560.m realizado por Peter I. Corke. En el cual se utiliza los siguientes comandos:

Tabla 2.13. Tabla de comandos de MATLAB.

| Comandos | Función |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <i>link(α a θ d σ)</i> | Comando que sirve para asignar los valores D&H de cada eslabón. |
| <i>robot</i> | Herramienta de Simulink para unir los eslabones y formar el robot. |
| <i>qz, qr, qstretch</i> | Parámetros de giro y estiramiento para de los eslabones. |
| <i>drivebot</i> | Comando para plotear al robot |

Elaborado por Mena, J.

En la programación se usó seis eslabones puesto el primero corresponde al eslabón 0, para los valores que se encuentran en la tabla 2.10, en los ángulos de α y θ asignamos un valor de 90° , de la tabla 2.11 se colocó los valores de las distancias y en el último lugar que corresponde al tipo de coyuntura el valor de 0. Los valores de masas de cada eslabón se encuentran en la tabla 2.11, se aplicó valores estándar para el giro y estiramiento permisible del robot. Se asignó la variable Ptesis para el robot y la programación que se muestra en el Anexo F.

El siguiente paso fue presentar el robot en una gráfica para lo cual se usó el comando Drivebot y como variable a graficar Ptesis que entregó como resultado un modelo cinemático del robot para moverse libremente como muestra la figura 2.52.

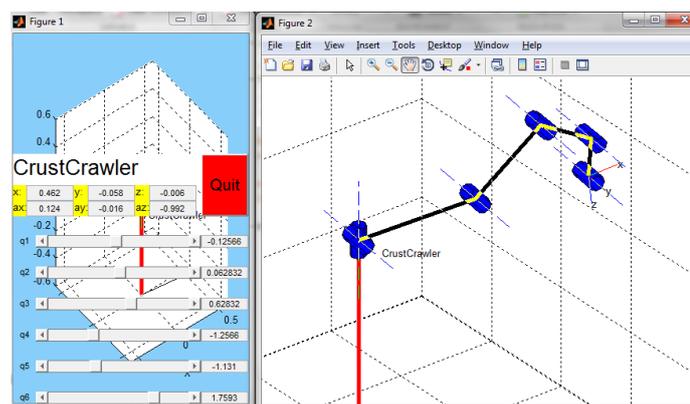


Figura 2.52. Gráfico de la variable Ptesis.

Elaborado por Mena, J.

En donde:

- q_1 representa la articulación 0 y q_2 la articulación 1, ambos se ubican en el mismo lugar y permiten un giro con respecto al eje X y al eje Z simultanea e individualmente.
- q_3 , q_4 y q_5 representan a las articulaciones 2, 3 y 4 las cuales pueden desplazarse únicamente con respecto al eje X
- q_6 representa la articulación 5 la cual gira exclusivamente con respecto al eje Z.

A continuación se muestra las gráficas de desplazamiento con respecto al tiempo en cada uno de los ejes que se dan en la parte final de manipulador en cada uno de los ejes, las medidas que se muestran son adimensionales y corresponden al movimiento general de cada eslabón.

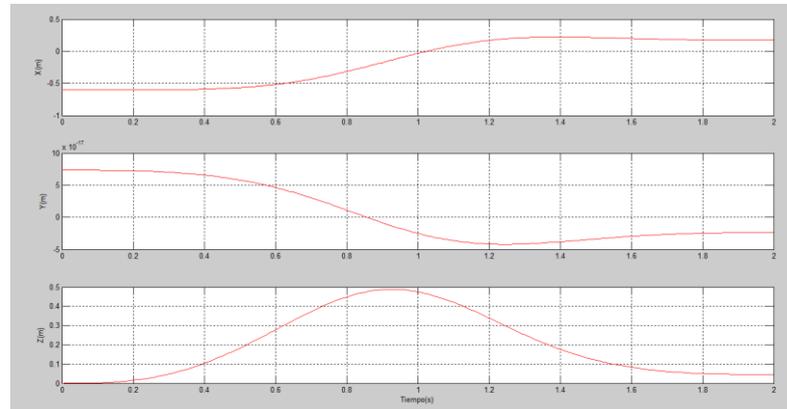


Figura 2. 53. Gráficas del desplazamiento en los ejes para el Manipulador.

Elaborado por Mena, J.

2.4. PLANIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Para la descripción de las piezas que conforman el Brazo Robótico CrustCrawler se prosigue con la descripción del producto, se toma en cuenta el objetivo final del robot, en donde la voz del ingeniero versus la voz del usuario serán tomadas en cuenta por el simple hecho de que sin importar lo muy sofisticado de un diseño, si no se puede vender, simplemente pierde valor.

Se entiende por voz del usuario a toda opinión ajena a un criterio de ingeniería el hecho es que al dejar a un lado este factor, se pierde valor en el producto.

Para ello se tomó nuevamente como referencia la configuración del brazo robótico CrustCrawler que se aprecia en la figura 1.3, tomando individualmente las divisiones del robot que se pueden apreciar en lo extenso del capítulo 2.1 y en conjunto las divisiones que se aprecian en la figura 2.51.

Para la función de calidad del producto se realizó una matriz de planificación como se describe en el capítulo 1.9 para relacionar lo que el cliente quiere contra una empresa va a cumplir esas necesidades.

2.4.1. Casa de calidad

La estructura básica de una tabla con “que” como las etiquetas de la izquierda y “cómo” en la parte superior. El techo es una matriz diagonal de “cómo vs cómo” y el cuerpo de la casa es una matriz de “Que vs cómo”. Ambas de estas matrices están llenas de indicadores de si la interacción del elemento específico es un fuerte positivo, una fuerte negativa, o algo intermedio. Anexos adicionales en la parte derecha e inferior tienen los “porqués” y los “cuantos”.

Las calificaciones basadas en los porqués y las correlaciones se pueden utilizar para calcular las prioridades de los cómo. A continuación se muestra la casa de la calidad establecida para el presente tema del proyecto. Como se puede apreciar en la figura 2.54 que consta de la opinión de la propia empresa y de dos competencias, entre muchas características que se observan.

B= básico
O=unidimensional
E=estimulante

| Voz del Usuario \ Voz del Ingeniero | Importancia | Dimensiones | Tipo de material | Peso | Inversión en Equipo | Evaluación del Usuario | | | D | E | F | G | H | I |
|-------------------------------------|-------------|-------------|------------------|-------|---------------------|------------------------|---------------|---------------|---|------|-----|---|-----|-----|
| | | | | | | Propia empresa | Competencia 1 | Competencia 2 | | | | | | |
| | | | | | | A | B | C | | | | | | |
| Resistente | B | 9 | 9 | 3 | 1 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1.25 | 1.5 | 5 | 9.4 | 22 |
| Duradero | O | 9 | 0 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 1.33 | 1.2 | 4 | 6.4 | 15 |
| Bajo Costo | O | 9 | 9 | 0 | 0 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1.25 | 1 | 4 | 5 | 12 |
| Facil ensamblaje | B | 9 | 0 | 3 | 9 | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 1.2 | 4 | 4.8 | 11 |
| Libre mantenimiento | B | 0 | 9 | 9 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 1.25 | 1.5 | 4 | 7.5 | 18 |
| Pequeño | B | 0 | 1 | 3 | 0 | 4 | 2 | 4 | 4 | 1 | 1.5 | 4 | 6 | 14 |
| Bajo consumo | E | 9 | 1 | 1 | 9 | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 | 1.2 | 3 | 3.6 | 8.4 |
| | | | | | | | | | | | | | 4.3 | 100 |
| Propia empresa | | 4 | 4 | 5 | 5 | | | | | | | | | |
| Competencia 1 | | 3 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | |
| Competencia 2 | | 4 | 4 | 3 | 3 | | | | | | | | | |
| Incidencia | | 217 | 206 | 183 | 126.6 | 734 | | | | | | | | |
| Incidencia en % | | 30 | 28 | 25 | 17.26 | 100 | | | | | | | | |
| Valor de referencia | | 34x600x50mm | Aluminio | 1.7Kg | 1000 \$ | | | | | | | | | |

Evaluación técnica
fuerte=9
medio=3
bajo=1

Factor de venta
fuerte=1.5
posible=1.2
ninguno=1

E=D/A
H=E*F*G

Figura 2.54. Casa de Calidad del Brazo Robótico a modificar.

Elaborado por Mena, J.

2.4.2. Análisis de competencias

Se realizó el análisis de competencia, el resultado indica que existen tres puntos que abarcan el 69% de las mejoras que en orden de importancia.

En concordancia al grupo de diseño, se tiene que la durabilidad y el tipo de material tienen una correlación positiva, mientras que una correlación negativa en cuanto a las dimensiones. Partiendo de la información de la casa de calidad se procedió a determinar particularidades técnicas, como muestra la tabla 2.14 con la siguiente simbología: C=cliente, I=industria, R=requerimiento, D=deseo.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del Brazo Robótico CrustCrawler.

| ESPECIFICACIONES | | Producto: Brazo Robótico | |
|-------------------------------|---------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CONCEPTO | Propone | R/D | DESCRIPCIÓN |
| Función | I | R | El robot debe ser óptimo para el paletizado. |
| | I | R | Dispondrá de un control amigable para el usuario. |
| | I | R | El Brazo Robótico será capaz de acoplarse a múltiples medios y ocupará el menor espacio posible. |
| | I | R | El Brazo Robótico podrá soportar una carga adicional de aproximadamente 1kg sin entorpecer su movilidad. |
| Dimensiones | C | R | Colocando el Brazo Robótico verticalmente se tiene unas dimensiones prismáticas de aproximadamente 34x600x50mm. |
| Tipo de material | C | R | Principalmente aluminio entre otros polímeros. |
| Peso | I | R | Ignorando la base el peso aproximado del robot es de 1.7kg. |
| Inversión en el equipo | I | R | Dado que el precio tiene múltiples variantes se estima una media de \$1000. |

Elaborado por Mena, J.

2.4.3. Análisis funcional

El propósito del análisis funcional es separar la acción que se efectúa del componente o mecanismo, para de este modo buscar nuevas soluciones, para ello es necesario establecer claramente las funciones primarias y secundarias. La razón que se usa para realizar los diagramas funcionales está descrito en el capítulo 1.9.1, para este análisis se describe el proceso

de cambio de posición del brazo robótico CrustCrawler describiendo de forma estandarizada el proceso que se aprecia en la figura 2.55, que consta de tres niveles, el nivel cero representa un entendimiento básico, el nivel uno retrata fundamentalmente el proceso y el nivel dos lo detalla más a fondo.

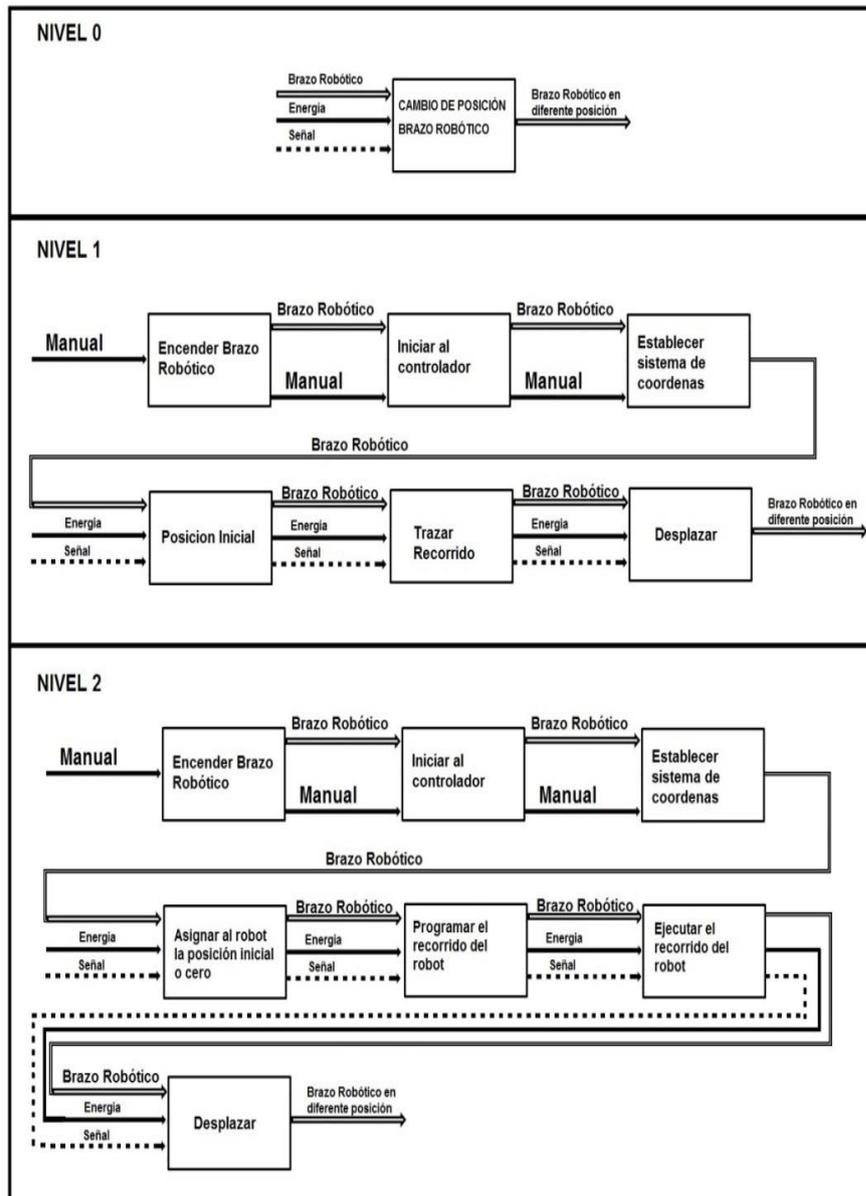


Figura 2.55. Diagramas Funcionales del Brazo Robótico CrustCrawler.

Elaborado por Mena, J.

Para la generación de los módulos se tomó en cuenta en nivel dos, el cual tiene dos funciones principales Inicializar al Robot y Desplazar al Robot, por lo cual al sistema se lo dividió en dos módulos que realicen las funciones correspondientes, como se aprecia en la figura 2.56.

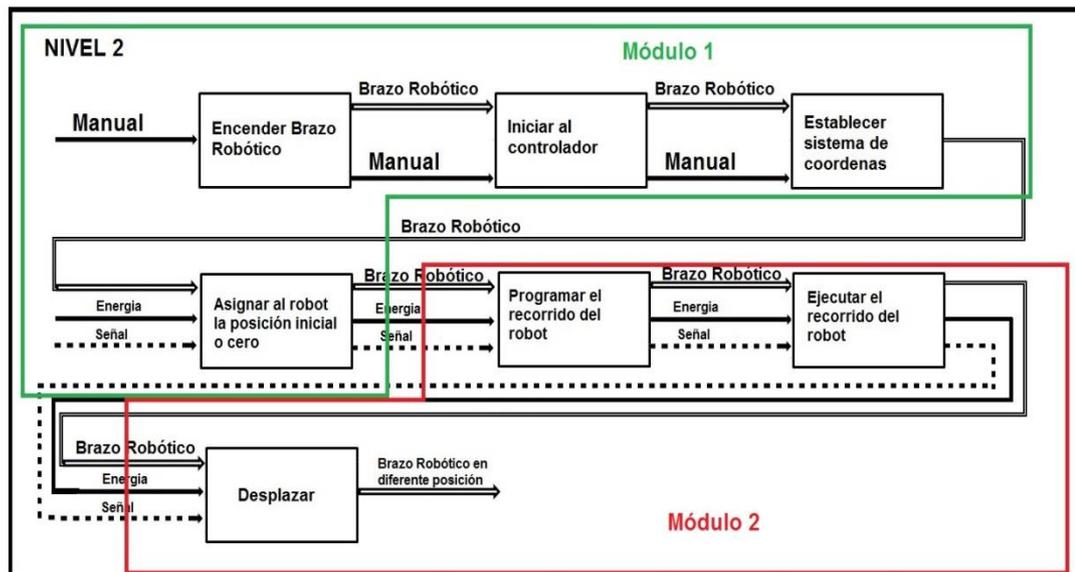


Figura 2.56. Módulos para el análisis funcional del Brazo Robótico CrustCrawler.

Elaborado por Mena, J.

MÓDULO 1

El módulo 1 debe cumplir con las siguientes funciones:

- Encender Brazo Robótico.
- Iniciar al controlador.
- Establecer sistema de coordenadas.
- Asignar la posición inicial o cero.

Encender Brazo Robótico: Como toda máquina, el Brazo Robótico debe ser encendido, en este proceso se asegura que tanto el controlador como el Robot se encuentren listos para empezar a ser operados.

Iniciar al controlador: Por motivos de seguridad siempre se suele tener al controlador indiferentemente de como sea bloqueado ya sea por hardware o software, en dicho caso, la forma de desbloquearlo puede ser desenclavando el paro de emergencia o ingresando una clave de seguridad.

Establecer sistema de coordenadas: Pueden ser esféricas, lineales por ejemplificar, esta tarea se realiza desde el controlador.

Asignar al robot la posición inicial o cero: Para esto se necesita colocar al robot en la posición inicial que usara como eje de referencia y paso seguido almacenarlo, de igual forma que el paso anterior, esto se realiza desde el controlador.

MÓDULO 2

El módulo 2 debe cumplir con las siguientes funciones:

- Programar recorrido del robot
- Ejecutar el recorrido del robot
- Desplazar

Programar recorrido del robot: El robot tomando como punto cero el antes programado deberá moverse posición tras posición almacenando en memoria cada punto tridimensional que se necesite.

Ejecutar el recorrido del robot: este paso es propiamente la repetición de las posiciones almacenadas pero en modo semiautomático para realizar ajustes.

Desplazar: Ahora el robot ejecuta la acción de manera automática totalmente libre de errores.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y DESARROLLO

En lo extenso de este capítulo se facilitó soluciones que van desde una vista general del brazo robótico CrustCrawler tomando en cuenta posibles mejoras en su funcionalidad y en su diseño, después se asignó las propuestas individuales para cada uno de los elementos que componen la estructura y en la parte final se validó a cada una de las propuestas mediante el uso de software CAE.

3.1. ANÁLISIS GENERAL PARA MODIFICAR EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER.

Tomando en cuenta los datos del capítulo 2.4, para modificar el brazo robótico CrustCrawler se debe tomar en cuenta dos características; en primera estancia que el usuario aprecia el dinamismo y estética de la estructura y en segunda estancia que el hecho de reducir el peso de cada elemento ofrece una mejora en el rendimiento para el paletizado puesto que mejoraría la movilidad.

3.2. REDUCCIÓN DE MASAS DE LAS PIEZAS DE LA ESTRUCTURA PARA EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER

Se analizó los módulos del capítulo 2.4.3 que se muestran en la figura 2.55, se apreció muy detalladamente el hecho que el brazo robótico es utilizado para el paletizado, dado que todo lo que tiene que ver con el control del robot no es tema de esta tesis nos enfocaremos únicamente en el MÓDULO 2, puesto que cada modificación que se realice sobre las piezas del motor pueden facilitar el desplazamiento del mismo por lo cual se parte de dos parámetros los cuales son: el peso y las dimensiones. Como se puede ver en la tabla 2.12 la masa y el rendimiento están vinculados a menor peso tenga cada elemento del brazo robótico CrustCrawler mayor carga podrá soportar; y, la forma en la cual se puede ejecutar este procedimiento es reduciendo medidas. Para lo cual se realizó cada

propuesta individualmente a cada elemento dividiéndolos al igual que en capítulo 2, tomando en cuenta la configuración de la figura 1.3.

3.2.1. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 106T.

Para los servo motores DYNAMIXEL MX-106T se tienen en total dos articulaciones, un adaptador de placa doble, un adaptador de placa simple, una viga de 127mm, dos bases para servo motor, una mesa giratoria y un disco de 113mm, debido a que el interés de este proyecto de tesis es mejorar el paletizado se considera innecesario modificar tanto la mesa giratoria como el disco de 113mm. Como el propósito es reducir la masa del objeto, entonces se intentará no modificar ninguna perforación u orificio caso contrario se especificara las razones para dicho cambio.

a) Articulación

Como se observa en la figura 2.48 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia los costados del objeto, para optimizar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que se procedió a retirar material ubicado en la vista lateral. Se creó una circunferencia concéntrica a la perforación de 10mm que se encuentra en la parte superior con un diámetro de 28.1mm y a una distancia de 10.8mm del centro de la pieza, se cerró el contorno y una réplica en el otro lado con la herramienta de simetría como se muestra en la figura 3.1.

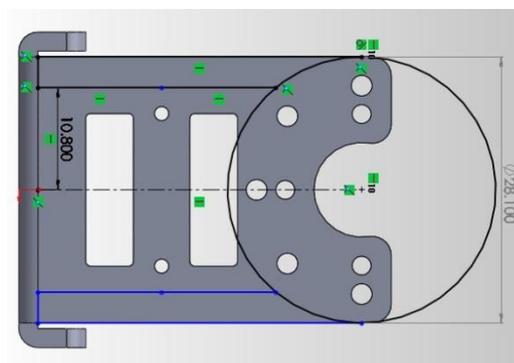


Figura 3.1. Parámetros a modificar en la articulación del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó los laterales dando como resultado lo que muestra la figura 3.2 la cual aproximadamente tiene una reducción del 10% de su peso.

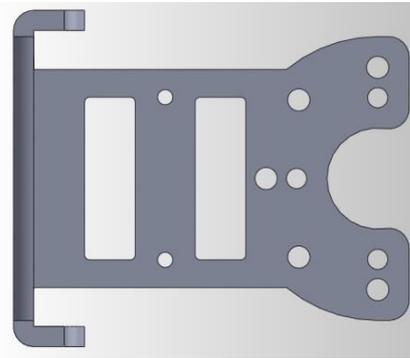


Figura 3.2. Propuesta a realizarse en articulación del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

No se modificó ninguna perforación, dado que las circulares corresponden a la distribución ya mencionada antes y los rectangulares son para la ubicación del cableado del robot, siendo óptimos para este propósito.

b) Adaptador de placa doble

Como se observa en la figura 2.43 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el contorno del objeto, para optimizar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje, de tal forma que se procedió a retirar material. En la vista frontal se trazó un nuevo contorno que se encuentra en todo momento a 4mm de distancia del centro de las circunferencias del sólido como muestra la figura 3.3.

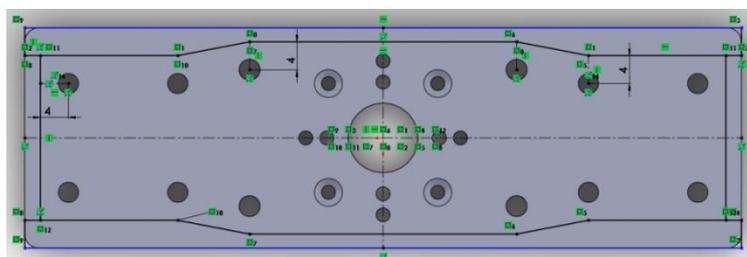


Figura 3.3. Parámetros a modificar en el adaptador de placa doble del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó los laterales dando como resultado lo que muestra la figura 3.4 la cual aproximadamente tiene una reducción del 10% de su peso.

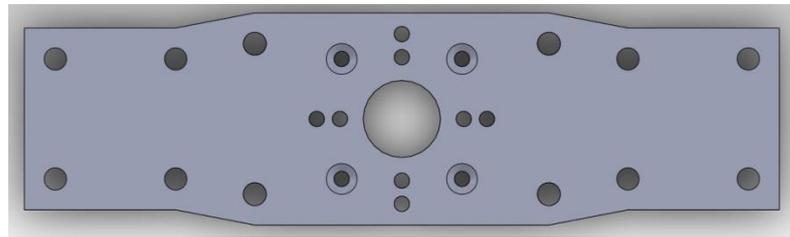


Figura 3.4. Propuesta a realizarse en el adaptador de placa doble del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

c) Adaptador de placa simple.

Como se observa en la figura 2.42 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el contorno del objeto, para mejorar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que se procedió a retirar material en la vista frontal, se trazó un contorno sobre el sólido que se encuentra separada a 3.5mm de las circunferencias externas y a 3mm en su parte interna como muestra la figura 3.5.

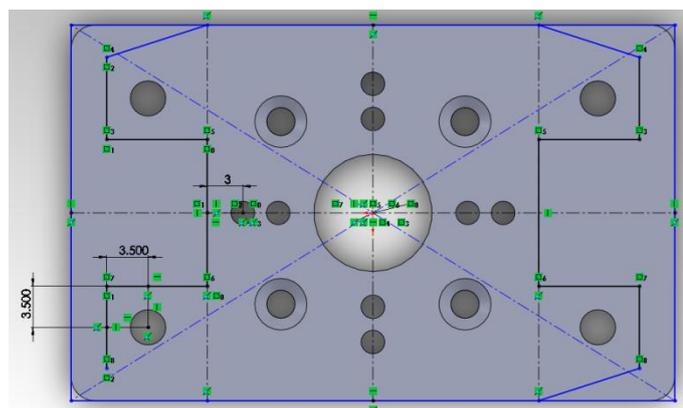


Figura 3.5. Parámetros a modificar en el adaptador de placa simple del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó los laterales dando como resultado lo que muestra la figura 3.6 la cual aproximadamente tiene una reducción del 35% de su peso.

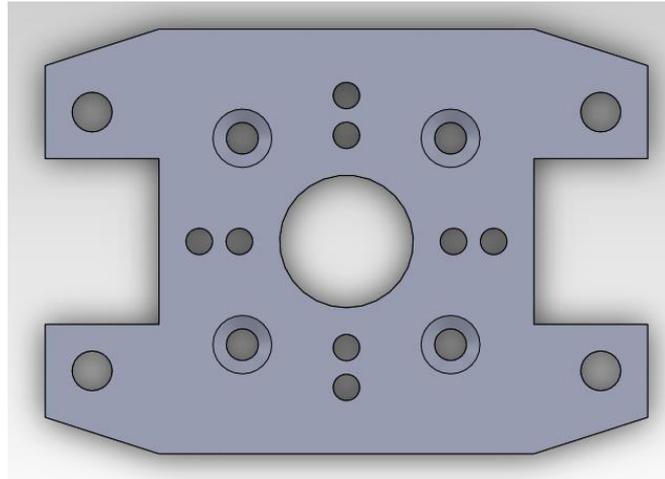


Figura 3.6. Propuesta a realizarse en el adaptador de placa simple del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

d) Viga de 127mm

Como se observa en la figura 2.44 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el centro del objeto, para optimizar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que se procede a retirar material alrededor de las perforaciones traseras de 12.5mm de diámetro y los extendemos hasta la base a un punto que se encuentra a 11mm del centro, se duplicó la instrucción en la parte superior como se muestra en la figura 3.7.

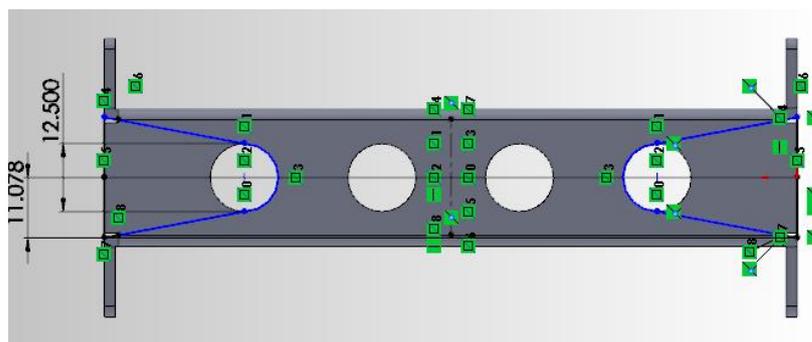


Figura 3.7. Parámetros a modificar en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó la las figuras geométricas 2mm dando como muestra la figura 3.8 la cual aproximadamente tiene una reducción del 10% de su peso.

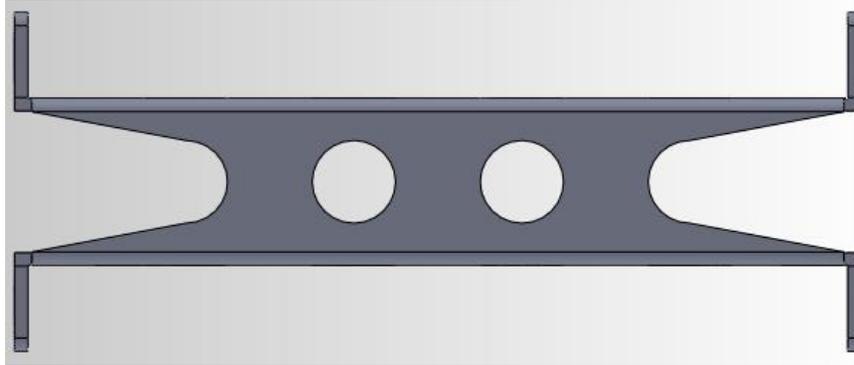


Figura 3.8. Propuesta a realizarse en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

e) Base para servo motor

Como se observa en la figura 2.49 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el contorno del objeto, para optimizar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que no se procedió a retirar material puesto en los laterales y el centro se perdería sujeción.

f) Mesa giratoria y disco de 113mm

Ambos elementos que conforman el eslabón 0 del brazo robótico no fueron elemento de modificación por los siguientes factores:

- Su función es la de sujetar el sistema completo a una superficie firme.
- La mesa giratoria no genera una carga extra a ningún motor.
- El disco respeta la distribución de la figura 2.1. y modificarlo de alguna forma sería poco eficiente.

Por lo mencionado, entonces, cualquier cambio a estas piezas no representa una mejora a la cinemática del robot, puesto como su nombre lo indica son la base del mismo y no influyen en el movimiento, solo lo sostienen en una superficie firme horizontal.

3.2.2. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 64T.

Para los servos motores DYNAMIXEL MX-64T se tienen en total tres articulaciones, dos adaptadores de placa simple, una viga de 63.5mm, cinco bases para servo motor y dos adaptadores tipo L.

Las Articulaciones, los Adaptadores de Placa Simple y las Bases para Servo Motores son las mismas que se usan para el Servo Motor DYNAMIXEL MX 106T.

a) Viga de 63.5mm

Como se observa en la figura 2.45 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el centro del objeto, para mejorar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma se procedió a retirar material, en la vista trasera se trazó un rectángulo en la base simétrico de 11x18.5mm, se duplicó la instrucción en la parte superior como se muestra en la figura 3.9.

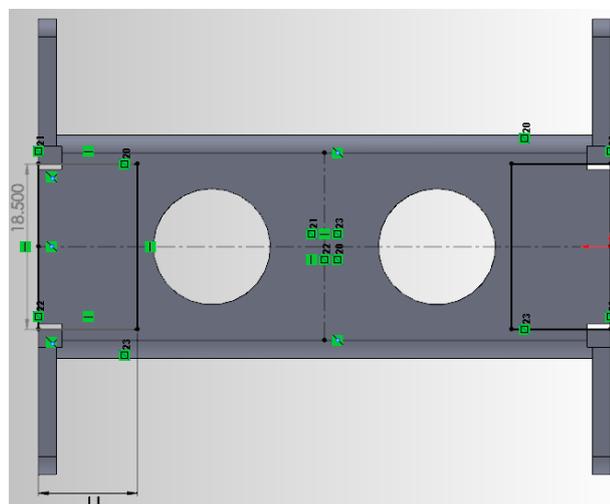


Figura 3.9. Parámetros a modificar en la viga de 63.5mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó las figuras geométricas 2mm dando como resultado lo que revela la figura 3.10 la cual aproximadamente tiene una reducción del 10% de su peso inicial en aluminio.

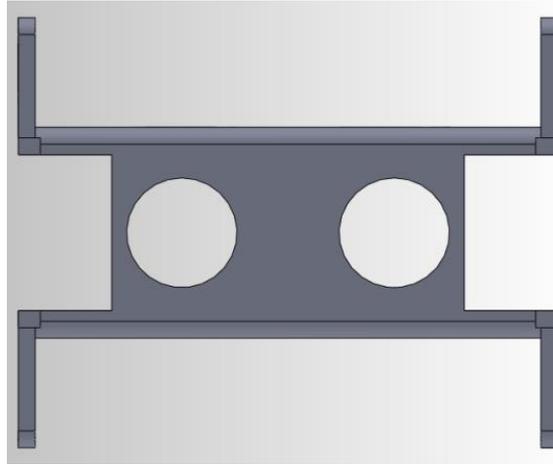


Figura 3.10. Propuesta a realizarse en la viga de 127mm del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

b) Adaptador tipo L

Como se observa en la figura 2.46 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el contorno del objeto, para mejorar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que se procedió a retirar material en la vista lateral, se colocó perforaciones como se muestra en la figura 3.11 que distan al menos 2mm de los semi-óvalos.

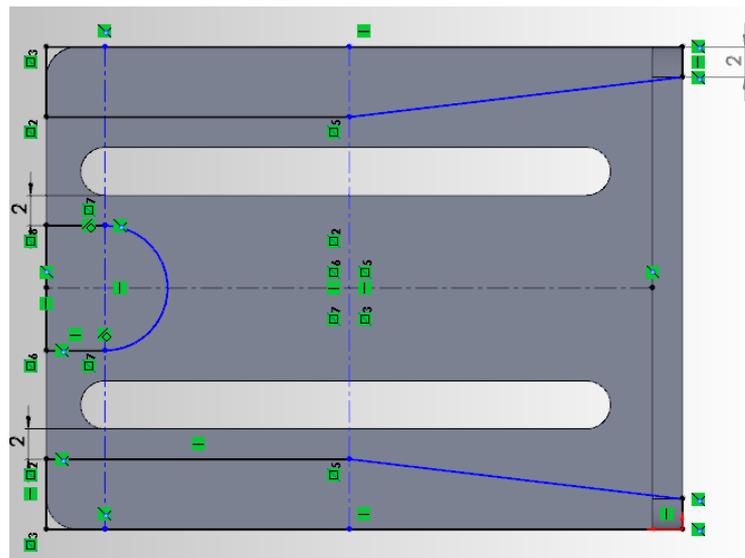


Figura 3.11. Parámetros a modificar en el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó los laterales dando como resultado el sólido de la figura 3.12 la cual aproximadamente tiene una reducción del 20% de su peso.

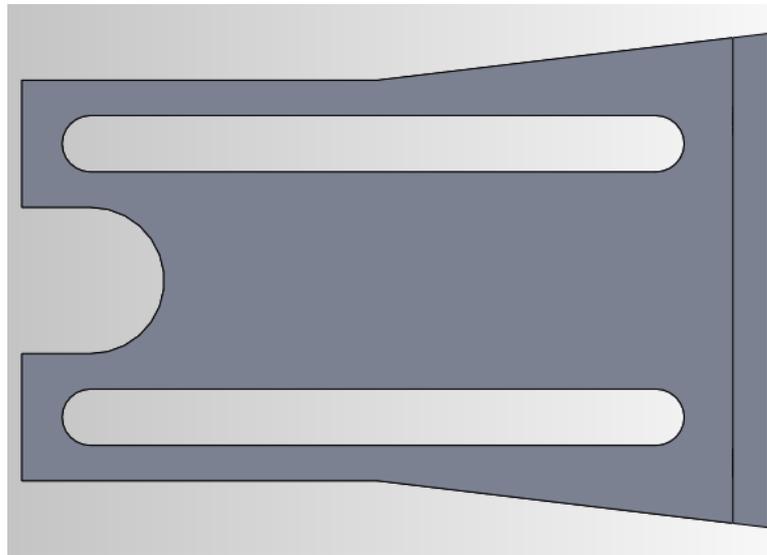


Figura 3.12. Propuesta a realizarse en el adaptador tipo L del servo motor DYNAMIXEL MX106T.

Elaborado por Mena, J.

3.2.3. Piezas a modificarse acoplables al servo motor DYNAMIXEL MX 28T.

Para los servos motores DYNAMIXEL MX-28T se tienen en total dos articulaciones para pinza, una base para servo motor reducida y un juego de pinzas.

a) Articulaciones para pinza

Como se observa en la figura 2.47 la tendencia de optimización del elemento se dirige hacia el contorno del objeto, para mejorar se debe respetar la distribución de la figura 2.1 y así evitar fallos en montaje de tal forma que se procedió a retirar material en la vista lateral. Se trazó una circunferencia de 25mm de diámetro concéntrica con la perforación de 10mm de diámetro, una línea que va desde un punto a 1.5mm de distancia del borde del sólido hasta la circunferencia y es paralela al otro extremo de la pieza, cerrando este espacio con el contorno como se muestra en la figura 3.13.

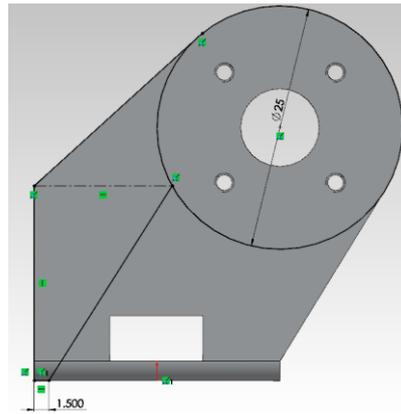


Figura 3.13. Parámetros a modificar en la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó los laterales dando como resultado el sólido de la figura 3.14 la cual aproximadamente tiene una reducción del 30% de su peso.



Figura 3.14. Propuesta a realizarse en la articulación para pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

b) Pinzas

Para este objeto las modificaciones a realizarse están sujetas a un criterio diferente al establecido, únicamente se intentó dar mayor funcionalidad ignorando el criterio general aplicable en el resto de piezas, esto se debe a que su función es la de sujetar un objeto y en este caso resulta mejor para la eficiencia del robot que estas faciliten el transporte. Para lo cual se realizó un dentado, en vista superior se dibujó un dentado de 2mm en la superficie donde se sujetaran objetos como se muestra en la figura 3.15.

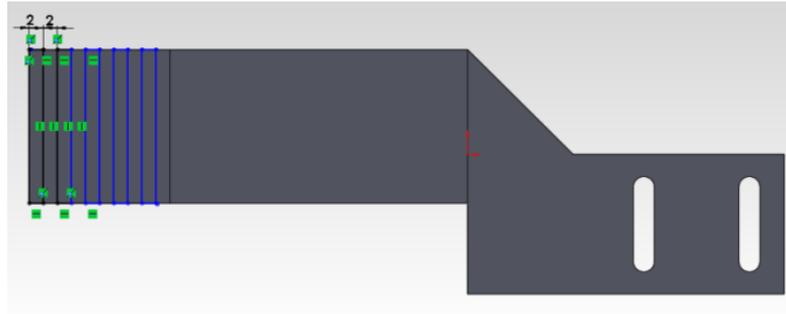


Figura 3.15. Parámetros a modificar en la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó 1mm intercalando los espacios para crear un dentado rectangular dando como resultado el sólido de la figura 3.16, se aplicó el mismo procedimiento en la otra pinza.

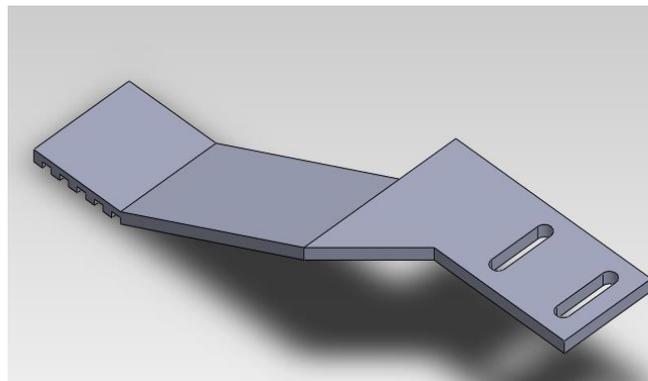


Figura 3.16. Propuesta a realizarse en la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

3.3. MODIFICACIÓN DE PIEZAS A USARSE EN EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER

Para entender en que parte se aportará menor impacto en la cinemática del robot se utilizó al modelo matemático creado de la estructura del Brazo Robótico como se ve en la figura 2.52, al movilizar cada eslabón en el programa se llegó a la conclusión de que es preferible no modificar los primeros tres eslabones lo cual genera una segunda opción, que es modificar los elementos que se encuentran en los últimos eslabones puesto acarrear menor longitud y por ende menor carga.

3.3.1. Incremento de dimensiones de las piezas de la estructura del brazo robótico CrustCrawler.

Se añadió peso extra en las articulaciones para pinza, en las pinzas, en los adaptadores tipo L y la base para servo motores reducida, lo que permite modificar las dimensiones de estos cuatros. Solo se aplicara a dos de ellos los cuales son:

a) Base para servo motores reducida

Se tomó la decisión de extender la base para servo motores reducida en la vista lateral con las dimensiones que se muestran en la figura 3.17, creando una circunferencia de 27mm de diámetro cuyo centro dista 17mm de la perforación circular del sólido, se extendió el contorno para que diste con respecto al centro de la circunferencia recién trazada, replicando en el otro extremo el procedimiento.

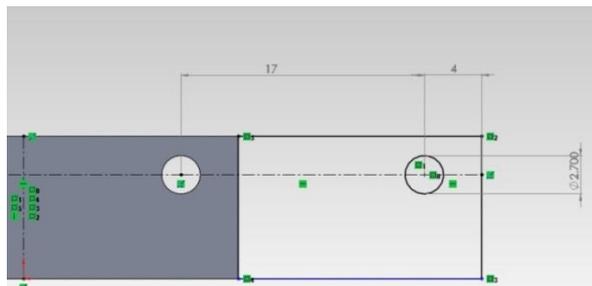


Figura 3.17. Ampliación de la base para servo motor reducida.

Elaborado por Mena, J.

Se repitió en ambas caras el proceso, realizando una extracción de 2mm para finalizar y da como resultado el sólido de la figura 3.18. Esta nueva pieza pesa apenas 23gr más que su versión original.

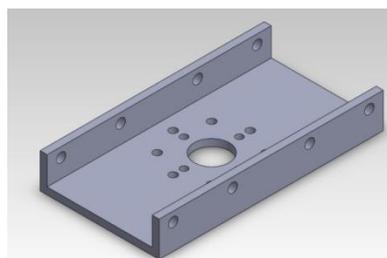


Figura 3.18. Base para servo motores reducida modificada.

Elaborado por Mena, J.

b) Pinza

En la vista superior, ubicado en el borde izquierdo se realizó un trapecio con 22mm de base mayor, 5mm de base menor y 40mm de altura como se muestra en la figura 3.19.

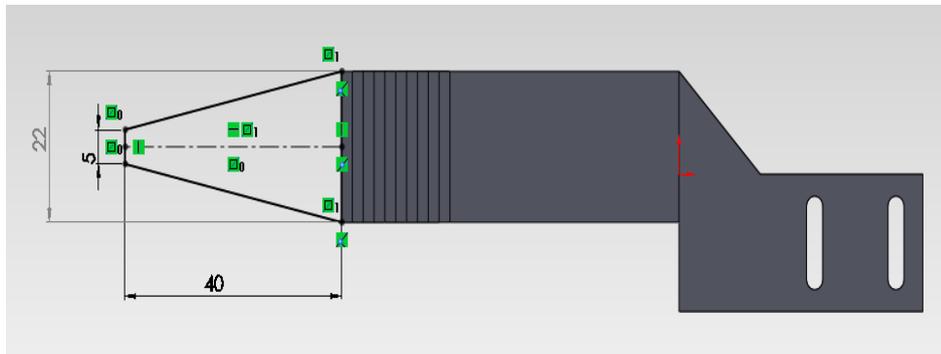


Figura 3.19. Ampliación de la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

Se extruyó la figura geométrica y se realizó un dentado sobre esta nueva superficie con las características que se muestran en el literal b) del capítulo 3.2.3, en la vista frontal, ubicado en la punta se realizó un rectángulo de 0.5x5mm y se explotó un total de 2mm dando como resultado un sólido como se aprecia en la figura 3.20. Esta nueva pieza pesa apenas 5gr más que su versión original.

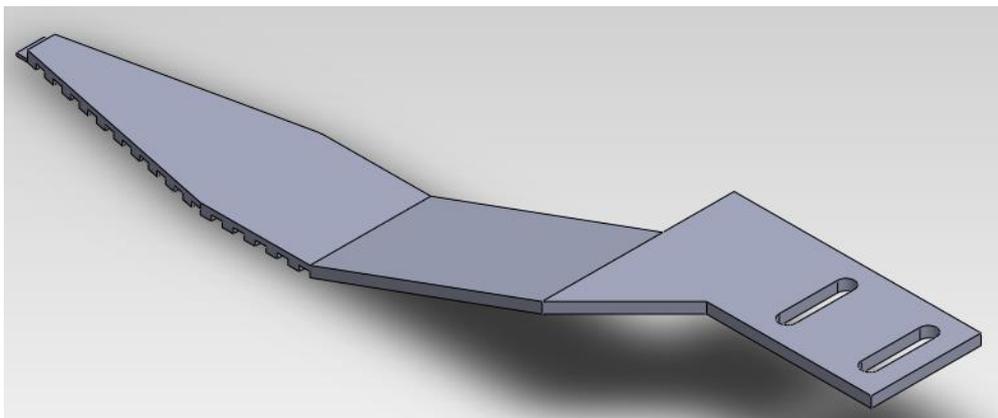


Figura 3.20. Ampliación de la pinza del servo motor DYNAMIXEL MX28T.

Elaborado por Mena, J.

3.4. VALIDACIÓN DE PIEZAS A USARSE EN EL BRAZO ROBÓTICO CRUSTCRAWLER.

Para la validación de las piezas, primero se seleccionó el material y después se procedió a usar el programa COMSOLD Multiphysic 4.4 y a continuación se describe un ejemplo para realizar el análisis estático, una vez descrito este procedimiento se realizó una tabla en donde están los factores de seguridad obtenidos con respecto a todas las piezas modificadas, cabe señalar que se realizó diferentes cambios para obtener los resultados que se muestran en la tabla 3.4, los cuales respetan lo mostrado en el capítulo 2.2.

Los factores de seguridad que buscamos idealmente se encuentran en el rango de 1.5 a 4 y como valor mínimo permisible 1.

3.4.1. Selección de material

Para escoger el material se usó el programa CES EduPack 2009 en el cual se introdujo un nivel 3 de estudio en el cual consta un universo de materiales para usarse. Se realizó una selección de material en donde se consideró todo el conjunto, se estableció límites como el precio, la densidad y límite elástico que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Límites para la selección de materiales.

| | Mínimo | Máximo |
|-----------------------------|--------|--------|
| Precio(\$/Kg) | 1 | 10 |
| Límite elástico(MPa) | 20 | 50 |
| Densidad(gr/cc) | 1 | 10 |

Elaborado por Mena, J.

Se obtuvo como resultado materiales como madera y plástico del cual debido a la facilidad de manufactura y teniendo su disponibilidad en el país se seleccionó un plástico ABS del cual se pueden ver sus características en el Anexo E.

3.4.2. Estudio estático

Se utilizó como ejemplo la modificación al adaptador de placa doble que se aprecia en la figura 3.4, dentro del programa usando el asistente, se buscó el análisis en tres dimensiones, Mecánica estructural, Mecánica estructural de Sólido, en donde se seleccionó un Estudio Estacionario, en geometría se importó una de las piezas en formato IGS, una vez realizado este proceso en materiales se colocó Plástico ABS para sólidos.

En propiedades mecánicas del sólido, en primera estancia se ubicó restricciones fijas, cargas superficiales de 50N y la gravedad, en este paso se consideró la dirección y el eje sobre el cual actúan las cargas.

Se usó un mallado extra fino para todo el sólido, una vez terminado estos pasos se procedió a realizar el estudio para generar los resultados como muestra la figura 3.21.

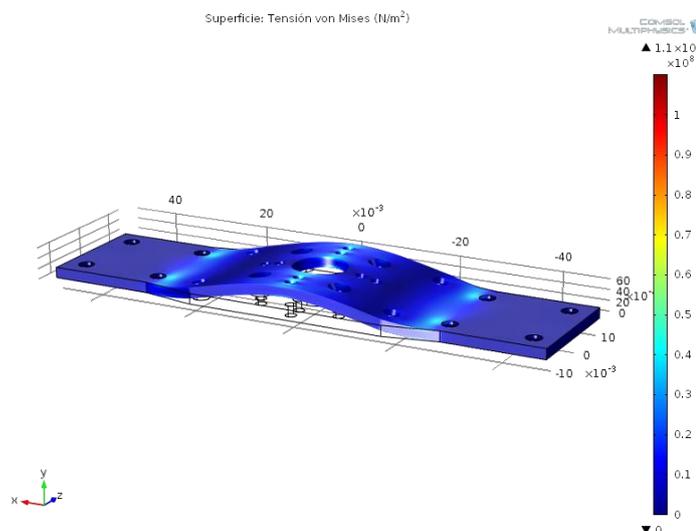


Figura 3.21. Tensión von Mises para el Adaptador de Placa Doble del Brazo Robótico CrustCrawler.

Elaborado por Mena, J.

Se usó el valor máximo y a su vez el valor más representativo en la deformación que se observa. Se forzó modificaciones en el sólido hasta obtener valores que estén dentro del rango que buscamos. Los valores que mencionamos en este caso nos reveló factores de seguridad de 2.72 y 4.16, estos valores se encuentran en el rango que buscamos por lo cual se valida

la pieza. Se repitió este procedimiento en todos los sólidos, y una vez obtenidos los resultados deseados se arma la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 3.2. Factores de Seguridad para el Robot Manipulador.

| Nombre | Material | Tensión von Mises máxima (MPa) | Factor de seguridad | Peso (gr) |
|----------------------------------|-----------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Adaptador de Placa Doble | ABS | 26.5 | 1.66 | 5 |
| Adaptador de Placa Simple | ABS | 16.5 | 2.66 | 2 |
| Adaptador Tipo L | ABS | 28.7 | 1.53 | 2 |
| Articulación 64T | ABS | 28.7 | 1.53 | 7 |
| Articulación 106T | ABS | 22.1 | 1.99 | 7 |
| Articulación pinza | ABS | 34 | 1.3 | 5 |
| Base para S. Motor | ABS | 17 | 2.58 | 3 |
| Base para S. Motor 28T | ABS | 16.8 | 2.6 | 4 |
| Disco 113mm | ABS | 27 | 1.62 | 32 |
| Mesa Base | ABS | 15 | 2.93 | 57 |
| Pinzas | ABS | 40 | 1.1 | 10 |
| Viga 127mm | ABS | 21.9 | 2 | 18 |
| Viga 63.5mm | ABS | 12.9 | 3.41 | 11 |

Elaborado por Mena, J.

3.4.3. Estudio cinemático

Ahora usando lo generado en el capítulo 2.3.3 aplicando los mismos criterios con los valores de la tabla 3.2, se obtuvo los mismos resultados en

la cinemática directa lo cual nos asegura que se tuvo el mismo resultado, pero con la diferencia que el robot es más ligero. En la figura 3.22 se puede apreciar el desplazamiento en cada uno de los ejes de la parte final del manipulador.

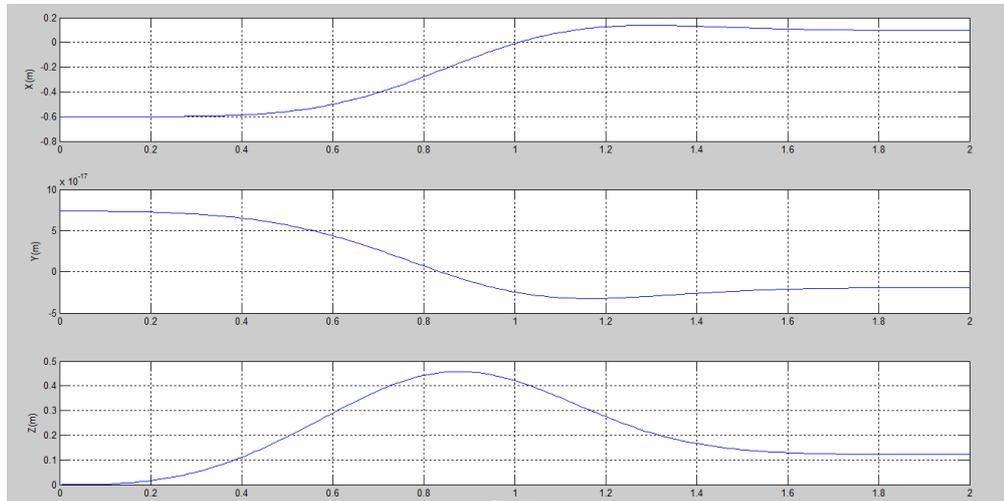


Figura 3.22. Gráficas del desplazamiento en los ejes para el nuevo manipulador.

Elaborado por Mena, J.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL BRAZO ROBÓTICO

4.1. GENERACIÓN DE PLANOS

Para la obtención de planos de cada una de las piezas, se usó laminas A3, en cuanto a los dibujos para todas las piezas se usa el código de dibujo técnico mecánico CPE INEN 003.

Para la elaboración del plano se tomó en primera estancia las cuatro vistas principales, las cuales son frontales, laterales, superiores e isométricas. Como se muestra en la figura 4.1.

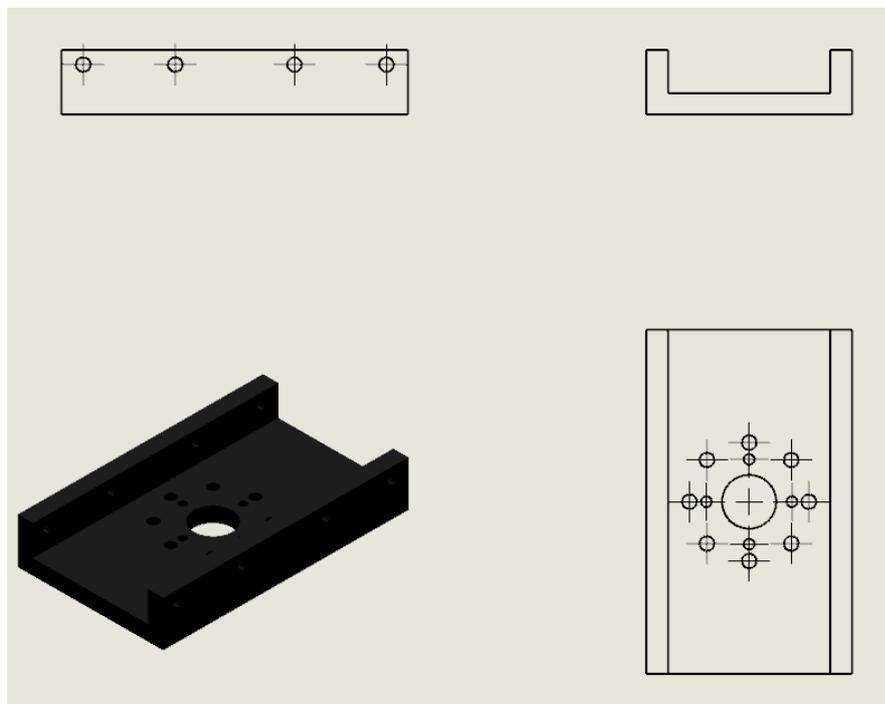


Figura 4.1. Cuatro vistas estándar del plano.

Elaborado por Mena, J.

Se acomodó y se ajustó la escala acorde para que sea estéticamente correcta, en el caso de la vista isométrica se agregó un sombreado con bordes, continuando con el proceso se colocó detalles en donde corresponde, de igual forma un segmento de la vista frontal dando como resultado lo que se muestra en la figura 4.2.

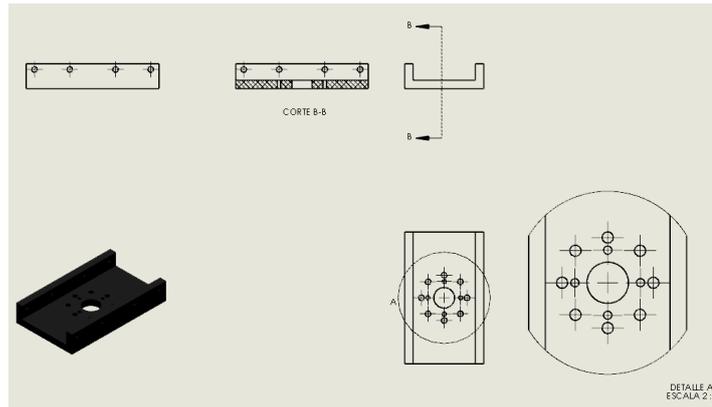


Figura 4.2. Detalles y Secciones del plano.

Elaborado por Mena, J.

Teniendo en cuenta la norma, se acotó el plano, para esto se usó cotas de color azul, también se creó la vista del abatido la cual se colocó al lado derecho de la vista isométrica como muestra la figura 4.3.

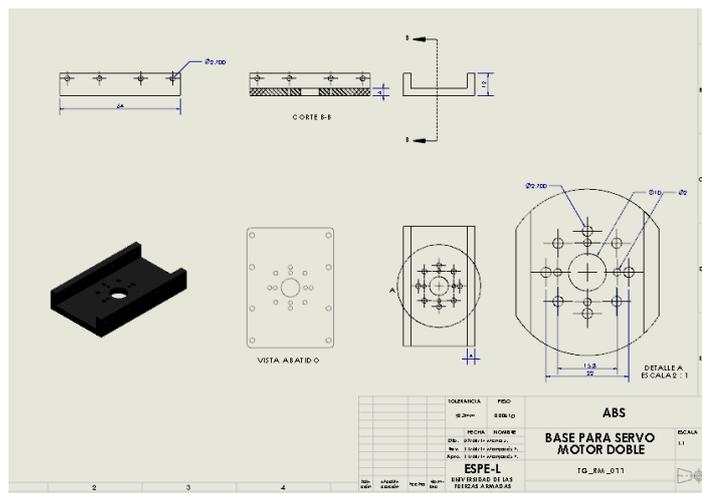


Figura 4.3. Cotas y vista abatida para el plano.

Elaborado por Mena, J.

El material que se usó para las piezas es plástico ABS de 2mm de espesor, se tomó una tolerancia de 0.2mm, el peso y la denominación para cada pieza es TG_RM_0XX, donde los últimos valores de numeración está acorde estas aparezcan en el ensamblaje.

Para el ensamblaje final, el cual tiene el nombre de Brazo Robótico, en su contenido las cuatro vistas como se ven en la figura 4.1, el despiece y

los detalles que se muestran en la figura 4.2 con la excepción de que solo se acota las juntas como se muestra en la figura 4.4.

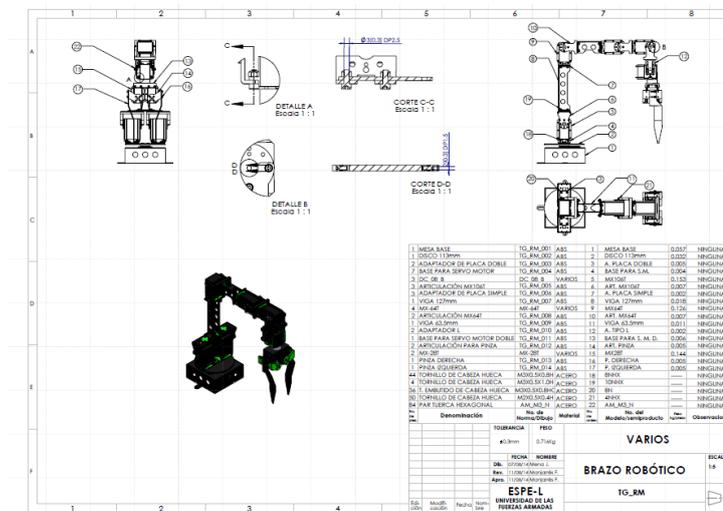


Figura 4.4. Plano general del Brazo Robótico.

Elaborado por Mena, J.

De igual forma para el despiece se creó una lista con todos los objetos necesarios para el ensamble, acorde a la norma, dicha tabla se puede apreciar en el Anexo A.

4.2. CONSTRUCCIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO

Para la manufactura del producto se realizó en la empresa privada EArD3D con la impresora Cincel3D Printer que trabaja con plástico ABS el cual se aprecia en la figura.

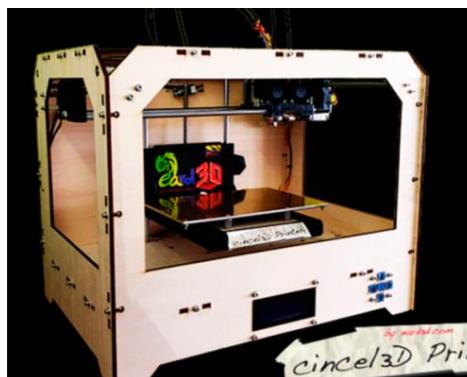


Figura 4.5. Impresora Cincel3D Printer.²²

²² EArD3D. (2014). <http://www.eard3d.com/#!/product/prd14/1720404725/cincel-3d-printer> [citado: 15-07-2014]

Las características técnicas de la máquina se encuentran en el Anexo G y la cotización en dólares de cada una de las piezas se muestra en la tabla 4.1, debido a que el precio se hace en relación por el volumen al final se añade un descuento del 25%, el tiempo total de maquinado fue aproximadamente de 20 horas, para todo lo demás se usó la nomenclatura propia del robot manipulador.

Tabla 4.1. Cotización del brazo robótico.

| Denominación | Cantidad | Color | Precio(\$) |
|------------------------------------|----------|-------|------------|
| TG_RM_001 | 1 | Negro | 60 |
| TG_RM_002 | 1 | Negro | 15.30 |
| TG_RM_003 | 3 | Verde | 8.50 |
| TG_RM_004 | 7 | Verde | 31.50 |
| TG_RM_005 | 2 | Negro | 17 |
| TG_RM_006 | 3 | Verde | 5.10 |
| TG_RM_007 | 1 | Negro | 19.55 |
| TG_RM_008 | 3 | Negro | 25.50 |
| TG_RM_009 | 1 | Negro | 11.90 |
| TG_RM_010 | 2 | Negro | 6.80 |
| TG_RM_011 | 1 | Negro | 4.25 |
| TG_RM_012 | 2 | Verde | 13.60 |
| TG_RM_013 | 1 | Negro | 10 |
| TG_RM_014 | 1 | Negro | 10 |
| Total | | | 239 |
| Descuento por volumen (25%) | | | 59 |
| Valor Final | | | 180 |

Elaborado por Mena, J.

4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO

Para implementar el brazo robótico, se usó la configuración estándar del brazo robótico CrustCrawler y se ilustró en el modo de ensamble de SolidWorks.

Para la base se ubica la mesa base y un motor DYNAMIXEL MX106T, se ajustó con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm, a continuación se colocó el disco de 113mm y un adaptador de placa doble alineado con el disco del servo motor que ira ajustado con cuatro tornillos M2 de cabeza hueca de 10mm.

Se ubicó dos bases para servo motores en los extremos del adaptador de placa doble con ocho tornillos embutidos M3 de cabeza hueca de 8mm, se colocó dos servos motores DYNAMIXEL MX106T, todo este procedimiento se ajustó con ocho tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm dando como resultado lo que se aprecia en la figura 4.6.

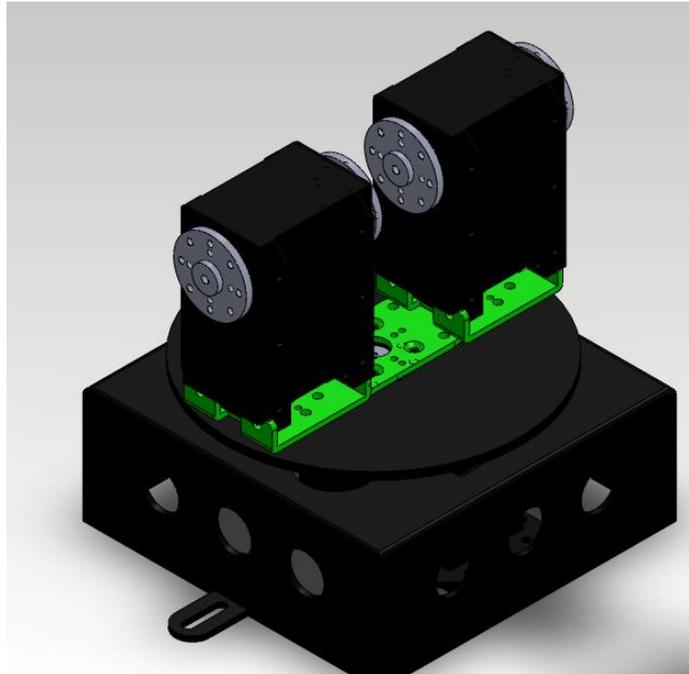


Figura 4.6. Ensamblaje de la base.

Elaborado por Mena, J.

Para el primer eslabón se colocó dos articulaciones MX106T en los servos motores y se ajustó con 12 tornillos M2 de cabeza hueca de 4mm, en la parte superior otro adaptador de placa doble el cual se ajustó en sus extremos con ocho tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm.

En el centro se colocó un extremo de la viga de 127mm y se ajustó con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 10mm, en el otro extremo se ubicó centrado un adaptador de placa simple ajustado con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 10mm, centramos una base para servo motor y se ajustó con respecto a la placa con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm, se colocó un servo motor DYNAMIXEL MX64T ajustado con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm, dando como resultado lo que se muestra en la figura 4.7.

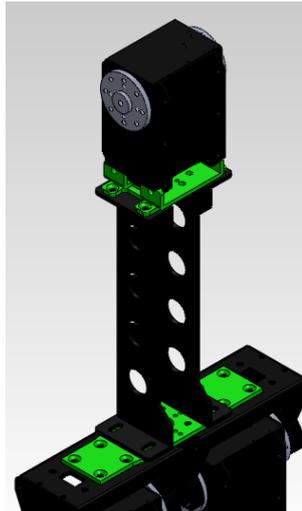


Figura 4.7. Ensamble del primer eslabón.

Elaborado por Mena, J.

Para el segundo eslabón en el servo motor se puso una articulación MX64T que se ajustó con seis tornillos M2 de cabeza hueca de 4mm. Se centra un adaptador de placa simple ajustado por cuatro tornillos M3 de cabeza, se ubicó una base de servo motor con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm.

La viga de 63.5mm se acompañó con un adaptador de placa simple y en su otro extremo lleva otro adaptador de placa simple, una base para servo motor y un servo motor DYNAMIXEL MX64T, todo esto está ajustado con doce tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm y cuatro tornillos M3 embutidos de cabeza hueca de 8mm, la figura 4.8 resume lo antes descrito.

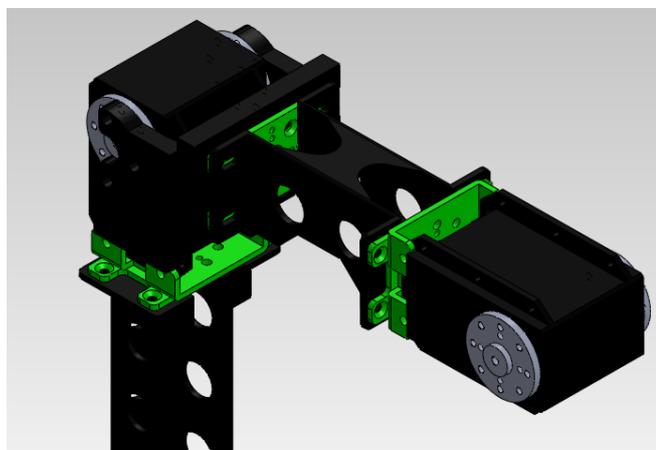


Figura 4.8. Ensamblaje del segundo eslabón.

Elaborado por Mena, J.

Para el tercer eslabón en el servo motor se puso una articulación MX64T que se ajustó con seis tornillos M2 de cabeza hueca de 4mm. Se centró un adaptador de placa simple ajustado con cuatro tornillos M3 de cabeza, se ubicó una base de servo motor con cuatro tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm. Como muestra la figura 4.9.

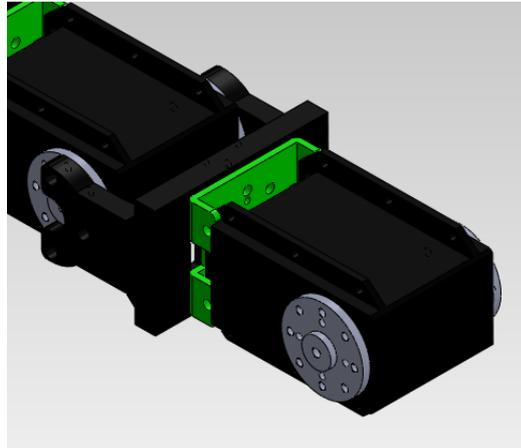


Figura 4.9. Ensamblaje del tercer eslabón.

Elaborado por Mena, J.

Para el cuarto eslabón en el servo motor se puso una articulación MX64T que se ajustó con seis tornillos M2 de cabeza hueca de 4mm. En los extremos se colocó dos Adaptadores L, en los laterales dos bases para servo motores y en medio un servo motor DYNAMIXEL MX28T ajustados con veinte tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm, dando un resultado como es visible en la figura 4.10.

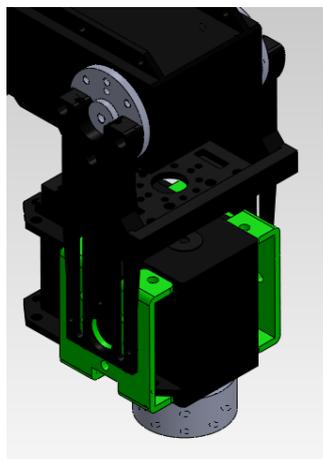


Figura 4.10. Ensamblaje del cuarto eslabón.

Elaborado por Mena, J.

Para el quinto y último eslabón, se ensambló el actuador del brazo robótico, para lo cual se colocó una base de servo motor doble, en sus extremos dos servo motores DYNAMIXEL MX28T ajustados por ocho tornillos M3 de cabeza hueca de 8mm, en los servo motores dos adaptadores para pinzas ajustados por dieciséis tornillos M2 de cabeza hueca de 4mm, en la base de estos adaptadores las pinzas izquierda y derecha ajustados a conveniencia con tornillos M3 de 8mm, se acopló al ensamble general uniendo el servo motor del eslabón 4 con la base del actuador, ajustando con cuatro tornillos M2 de cabeza hueca y el resultado se muestra en la figura 4.11 correspondiente al ensamblaje del brazo robótico.

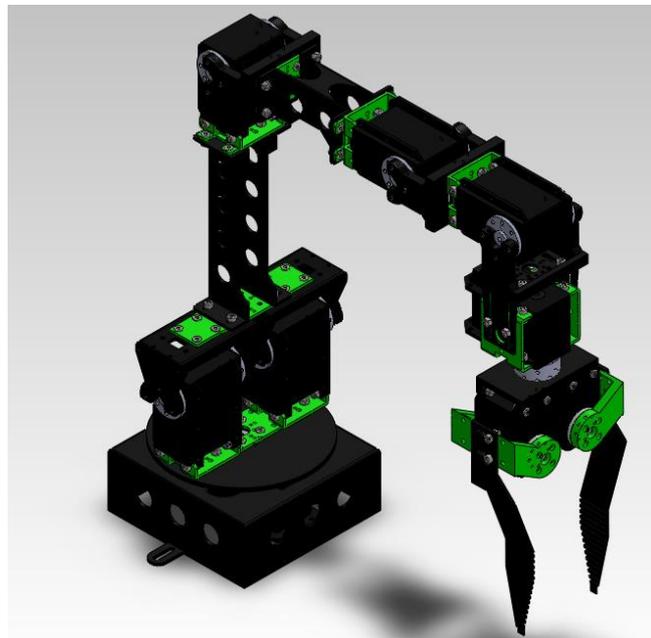


Figura 4.11. Ensamble final de brazo robótico.

Elaborado por Mena, J.

4.4. PRUEBAS FINALES

4.4.1. Mejoras de rendimiento para la estructura del brazo robótico.

En el programa Inspire de SolidThinking se obtuvo los pesos de las piezas modificadas y se creó una tabla para comparar las piezas originales como se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de masa originales, modificados y mejora porcentual de las piezas del Brazo Robótico CrustCrawler.

| Nombre | Masa 1 (gr) | Masa 2 (gr) | Mejora (%) |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|
| Adaptador de Placa Simple | 9 | 2 | 77.78 |
| Adaptador de Placa Doble | 18 | 5 | 72.23 |
| Viga de 127mm | 56 | 18 | 67.85 |
| Viga de 63.5mm | 47 | 11 | 76.59 |
| Adaptador Tipo L | 9 | 2 | 77.78 |
| Articulación | 22 | 7 | 68.18 |
| Articulación para pinza | 15 | 5 | 66.67 |
| Base para servo motor | 10 | 4 | 60 |

Elaborado por Mena, J.

Tabla 4.3. Componentes y peso de cada elemento del brazo Robótico modificado.

| Eslabón | Componentes | Masa(gr) | Mejora (%) |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| 1 | Articulación (2), Viga de 127mm, Adaptador de Placa Doble, Motor DYNAMIXEL MX106T, Base para Servo Motor, Adaptador Placa Simple. | 196 | 64.11 |
| 2 | Articulación, Viga de 63.5mm, Adaptador de Placa Simple (2), Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor. | 152 | 62.4 |
| 3 | Articulación, Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor. | 137 | 36.86 |
| 4 | Articulación, Motor DYNAMIXEL MX64T, Base para Servo Motor (2), Adaptador Tipo L (2). | 145 | 51.34 |
| 5 | Articulación para Pinza (2), Motor DYNAMIXEL MX28T, Base para Servo Motor. | 86 | 68.26 |

Elaborado por Mena, J.

La tabla 4.3 que corresponde a una estimación del peso por eslabones, tomando como referencia la figura 2.50 y a la mejora porcentual con respecto a los valores de peso que se encuentran en la tabla 2.11.

Realizando un promedio la estructura del Brazo Robótico tiene una reducción del 56.59% que representan 251gr menos de su peso y tomando este criterio aparentemente el rendimiento del Robot mejoró en la misma cantidad. La tabla 4.4 la cual contiene el rendimiento que cada motor requiere para mover la estructura con las modificaciones, el procedimiento a usar es el mismo que se describe en el capítulo 2.3.2.

Tabla 4.4. Rendimiento de los motores.

| Segmento | Fuerza(N) | Masa(Kg) | Rendimiento (%) |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------------|
| A-E | 26.18 | 2.67 | 21.13 |
| B-E | 14.9 | 1.52 | 25.48 |
| C-E | 34.59 | 3.52 | 9.44 |
| D-E | 93.73 | 9.56 | 2.35 |

Elaborado por Mena, J.

Comparando con la tabla 2.12 todos los motores experimentarían una mejora en su rendimiento, dando como total una mejora estimada del 20%. En donde el segmento A-E y B-E reciben una mejora considerable lo cual estima que tanto el Eslabón 1 como el Eslabón 2 generaran mejor movilidad al sistema.

Los 251 gr que se han reducido de la estructura pueden ser usados de diversas formas:

- Dos adaptadores de placa simple
- Dos adaptadores de placa doble

- Dos articulaciones tipo L
- Cinco articulaciones
- Dos articulaciones para pinza.
- Una vigas de 127mm
- Una vigas de 63.5mm
- Siete bases para servo motor

Que pueden ser añadidos dentro de la configuración estudiada y obtener el mismo rendimiento que se muestra en la tabla 2.12.

4.4.2. Mejoras cinemáticas para la estructura del brazo robótico.

Para esta parte se realizó una comparación entre las gráficas que están en la figura 2.53 y 3.22, el cual se muestra en la figura 4.12.

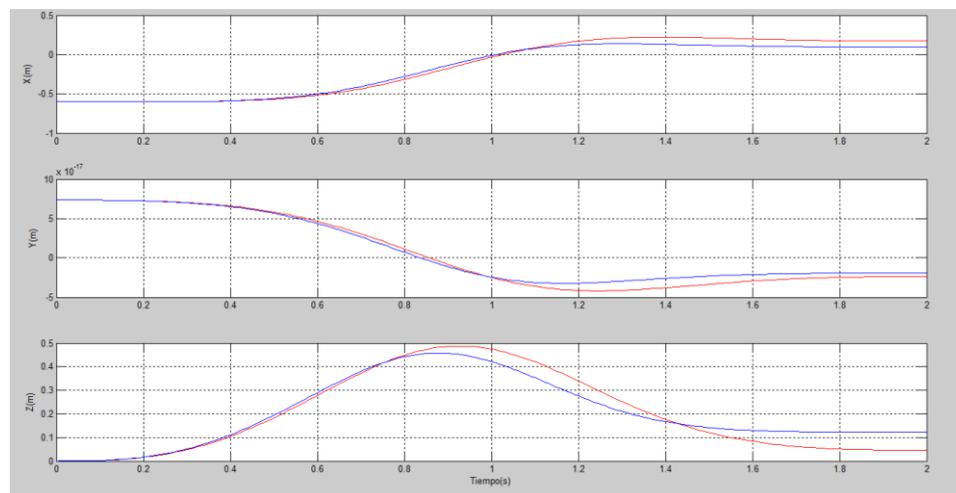


Figura 4.12. Comparación de graficas de desplazamiento en los ejes.

Elaborado por Mena, J.

Como se puede apreciar las gráficas, el color azul representa al manipulador con los cambios de masa y el rojo al modelo original de CrustCrawler, son similares con una ligera mejora en cada una, para tener un valor estimado de cuanto es la mejora se procede a tomar el valor final en cada eje y presentar la mejora porcentual del mismo como se ve en la tabla 4.5.

Tabla 4 5. Mejora del desplazamiento en los ejes.

| Gráfica | Eje X | Eje Y | Eje Z |
|------------|--------|-------|--------|
| Azul | 0.096 | 0 | 0.1222 |
| Roja | 0.1725 | 0 | 0.046 |
| Mejora (%) | 17% | 0% | 37% |

Elaborado por Mena, J.

Como se puede observar, no existe mejora significativa en el movimiento en el eje Y, pero en el caso del eje X y Z el manipulador le toma menos tiempo alcanzar la estabilidad en todos los puntos.

4.4.3. Análisis de las especificaciones técnicas

Tabla 4.6. Tabla de cumplimiento de las especificaciones técnicas

| ESPECIFICACIONES | | | Producto: Brazo Robótico |
|-------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| CONCEPTO | Cumplimiento | DESCRIPCIÓN | |
| Movilidad | 6 | El robot debe ser óptimo para el paletizado. | |
| Fácil uso | 5 | Dispondrá de un control amigable para el usuario. | |
| Multifuncional | 6 | El Brazo Robótico será capaz de acoplarse a múltiples medios, formas y ocupara el menor espacio posible. | |
| Peso de carga | 6 | El Brazo Robótico podrá soportar una carga adicional de aproximadamente 1kg sin entorpecer su movilidad. | |
| Dimensiones | 4 | Colocando el Brazo Robótico verticalmente se tiene unas dimensiones prismáticas de aproximadamente 34x600x50mm. | |
| Tipo de material | 6 | Principalmente aluminio entre otros polímeros. | |
| Peso | 6 | Ignorando la base el peso aproximado del robot es de 1kg. | |
| Inversión en el equipo | 6 | Dado que el precio es de \$1000. | |

Elaborado por Mena, J.

Esta tabla 4.6 se explica de la siguiente forma, en la tabla 2.14 se presentó datos técnicos que se deseaba obtener y a continuación se da una puntuación a cada uno de estos valores que se requerían para verificar un pleno cumplimiento en cuanto al diseño, para esta ponderación toman las opciones: Excelente, muy bueno, bueno, regular, malo, muy malo, ponderados del 6 al 1 respectivamente. Para dar por cumplido el diseño se deberá obtener una calificación mínima de 32. De tal forma los valores son:

- La movilidad recibe una calificación excelente debido a que el robot es óptimo para el paletizado.
- La facilidad de uso recibe una calificación muy buena, debido a ciertas variaciones en el controlador.
- La multifuncionalidad es excelente, dado que puede acoplarse a diferentes lugares y puede ensamblarse de diferentes formas.
- El peso de carga es excelente debido a que puede soportar un peso adicional mayor a 1Kg a mediana carga
- Las dimensiones son buenas debido a que las dimensiones prismáticas son casi las mismas del modelo original.
- El tipo de material es excelente debido a que se usó plástico ABS.
- El peso es excelente debido a que el nuevo manipulador pesa 716gr.
- La inversión del equipo es excelente debido a que el precio de las piezas fue de 180\$.

Debido a la calificación final de 45 se da por aprobado el nuevo manipulador.

La tabla 4.7 que se presenta a continuación es una reunión de todos los estudios estáticos y cinemáticos realizados en el proyecto de tesis, para un mejor entendimiento del proceso realizado entre el modelo CrustCrawler y el prototipo.

Tabla 4.7. Tabla comparativa del modelo CrustCrawler y el prototipo.

| Peso | | | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | | CrustCrawler | | Prototipo | |
| Elemento | Masa (gr) | Masa (gr) | Masa (gr) | Mejora (%) | |
| Adaptador de Placa Simple | 9 | 2 | | 77.78 | |
| Adaptador de Placa Doble | 18 | 5 | | 72.23 | |
| Viga de 127mm | 56 | 18 | | 67.85 | |
| Viga de 63.5mm | 47 | 11 | | 76.59 | |
| Adaptador Tipo L | 9 | 2 | | 77.78 | |
| Articulación | 22 | 7 | | 68.18 | |
| Articulación para pinza | 15 | 5 | | 66.67 | |
| Base para servo motor | 10 | 4 | | 60 | |
| Eslabón | Masa (gr) | Masa (gr) | Masa (gr) | Mejora (%) | |
| 1 | 290 | 196 | | 64.11 | |
| 2 | 223 | 152 | | 62.4 | |
| 3 | 158 | 137 | | 36.86 | |
| 4 | 184 | 145 | | 51.34 | |
| 5 | 112 | 86 | | 68.26 | |
| Peso Total | 967 | 716 | | 25.96 | |
| Rendimiento | | | | | |
| Segmento | Fuerza (N) | Masa (Kg) | Fuerza (N) | Masa (Kg) | Mejora (%) |
| A-E | 23.72 | 2.42 | 26.18 | 2.67 | 9.40 |
| B-E | 13.36 | 1.36 | 14.9 | 1.52 | 10.34 |
| C-E | 33.75 | 3.44 | 34.59 | 3.52 | 2.43 |
| D-E | 93.09 | 9.49 | 93.73 | 9.56 | 0.68 |

Elaborado por Mena, J.

4.5. APROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

¿Diseñar y construir la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa ofrecerá nuevas herramientas de diseño de elementos de máquinas y facilitara la producción del mismo en el país?

El diseño y construcción de la estructura de un brazo robótico con seis grados de libertad, aplicando ingeniería inversa, permitió aplicar nuevos software de diseño lo cual facilitara la obtención de resultados en el diseño

de elementos de máquinas y a su vez la tecnología y materiales que se usan para manufacturar el mismo se encuentran disponibles en el país a un precio accesible. Este proyecto le será útil a la Jefatura de Investigación y Vinculación con la Colectividad de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS "ESPE" EXTENSIÓN LATACUNGA y sus proyectos de investigación de alta capacidad científica y tecnológica

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se recopiló información proveniente de artículos técnicos, libros, monografías, tesis o ensayos sobre el diseño de Brazos Robóticos con seis grados de libertad.
- Se realizó ingeniería inversa al Brazo Robótico CrustCrawler y recopiló datos estructurales útiles para la ejecución del proyecto para obtener un modelo matemático con la ayuda de CAE que cumpla con las exigencias de diseño a realizarse en la estructura del Brazo Robótico.
- Se diseñó e implementó un prototipo digital de la estructura del Brazo Robótico mediante el uso de CAD.
- Se realizó la simulación de fuerzas actuantes, momentos y del movimiento sobre la estructura del Brazo Robótico mediante el uso de CAE.
- Se generó una base de datos con la información para de esta forma realizar una comparación con los datos pre-configurados.
- Se construyó la estructura del Brazo Robótico teniendo en cuenta los resultados que aportaron los simuladores.
- Se logró determinar al plástico ABS como la mejor opción para manufacturar la estructura del brazo robótico por su facilidad de moldeamiento y su precio accesible en el mercado.
- En la optimización de masas en CAD, se obtuvo una visión de cómo se podría retirar material de las piezas permitiendo conservar las propiedades físicas del mismo y sin excluir la voz del diseñador.

- La simulación de la cinemática del robot, permitió validar el estudio de la física del robot y comprobó que existen mejoras de rendimiento y movilidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- Por la precisión que requiere la manufactura del proyecto se recomienda usar exclusivamente impresoras en 3D o cortadoras laser, puesto existen espacios demasiado pequeños y medidas demasiado exactas para ser construido con métodos tradicionales.
- Para evitar daños en la estructura se recomienda no sobrepasar la capacidad de los motores.
- Debido a la fuerza de los motores del actuador se recomienda la mayor precisión al operarlo, puesto puede romper las pinzas que sujetan los objetos.
- Se recomienda antes de cualquier operación revisar el estado de las juntas del ensamble dado que la vibración afecta drásticamente a cualquier estructura.
- Se recomienda sujetar adecuadamente la base de la estructura sobre una superficie plana y horizontal.
- Los planos generados para el brazo robótico permiten que sea fabricado en diferentes materiales pero para su elaboración se recomienda tomar en cuenta las propiedades mecánicas del mismo y la facilidad de manufactura en el país.

BIBLIOGRAFÍA:

Dormido, S. (1993). Robótica Industrial: Tecnología, programación y aplicación. 2da Edición. México D.F. McGraw Hill.

Bermejo, S. (2005). Desarrollo de robots Basados en el comportamiento. 1ra Edición. Santiago de Chile. UPC.

Bergren, C. (2003). Anatomía del Robot. 3ra Edición. Chicago. McGraw - Hill

Gonzales, R. (2005). Robótica: Control, detección, visión e inteligencia. 2da Edición. Madrid. Mcgraw Hill.

Craig, J. (2006). Robotica. 3ra Edición. México D.F. Pearson Education.

Ribas, C. (2002). Diseño Concurrente. 2da Edición. Santiago de Chile. UPC

NETGRAFÍA:

Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

Dirk,A.(2013).<http://www.crustcrawler.com/products/ProRoboticArm/docs/ProSeries%20Technical%20Reference%20Guide.pdf> [citado:11-02-2014]

Dirk,A.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/MX28/docs/DYNAMIXEL%20MX28T.pdf> [citado: 03-02-2014]

DYNAMIXEL.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/RX64/docs/DYNAMIXEL%20MX64T.pdf> [citado:03-02-2014]

DYNAMIXEL.(2012).<http://www.crustcrawler.com/motors/EX106/docs/DYNAMIXEL%20MX106T.pdf> [citado:03-02-2014]

Georing,R. (2004). <http://www.mathworks.com/products/matlab> [citado: 07-02-2014]

Hyperworks,A.(2014).http://www.altair.com/ProductService.aspx?top_nav_name=Product%20and%20Services&item_name=Simulation%20Software [citado: 12-02-2014]

Solidworks.(2014).<http://www.solidworks.com/sw/support/CustomBulletins.html> [citado: 06-04-2014]

COMSOL. (2014). COMSOLINC. <http://www.comsol.com/products> [citado: 06-04-2014]

EArD3D.(2014).<http://www.eard3d.com/#!/product/prd14/1720404725/cinzel-3d-printer> [citado: 15-07-2014]

GLOSARIO

A

ABS: (Acrilonitrilo butadieno estireno) es un plástico muy resistente al impacto, muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos.

Aluminio (2024-T3): Es una aleación de aluminio en la que se usa el cobre como principal elemento en la aleación. Se usa en aplicaciones que requieren una relación fuerza/peso elevada y también presenta una buena resistencia a la fatiga.

C

CAE: (Computer Aided Engineering) o Ingeniería Asistida por Computadora.

CAD: (Computer Aided Design) o Ingeniería Asistida por Computadora.

Chaflandes: Recurso que consiste en unir con una línea los lados de dos esquinas.

CrustCrawler: Marca registrada de productos y brazos robóticos.

E

Extrusión: Es un proceso utilizado para crear objetos a partir de secciones transversales definidas y fijas.

D

DYNAMIXEL MX: Serie de actuadores de nueva generación de uso robótico.

G

GUI: (Graphical User Interface) o Interfaz Gráfica de Usuario.

GUIDE: Es un entorno de programación de Matlab para realizar y ejecutar programas de simulación.

I

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

IGES: Formato de archivo informático neutral de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora (CAD).

M

Mecanizado: Proceso de fabricación que comprende un conjunto de conformación de piezas mediante la eliminación de material.

MKS: Sistema de unidades que expresa las medidas, utilizando como unidades basada en metro, kilogramo y segundo.

Modelado: Proceso de creación o representación de un objeto real.

Morfogénesis: Proceso que se lleva a un conjunto para desarrollar su forma.

P

Paletizado: Acción y efecto de disponer mercancía sobre un palé para su almacenaje y transporte.

PUMA560: (Programmable Universal Manipulation Arm) o Brazo Manipulador Universal Programable.

Q

QFD: Despliegue de la función de calidad, es un método de gestión de calidad basado en transformar demandas del usuario en la calidad del diseño.

S

Simulink: Es un entorno de diagramas de bloque para la simulación y el diseño.

T

Toolbox: Caja de herramientas para realizar una operación u acción.

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A TG_RM: BRAZO ROBÓTICO

ANEXO B PLANOS DE PIEZAS

ANEXO B-1 P. TG_RM_001: MESA BASE

ANEXO B-2 P. TG_RM_002: DISCO 113MM

ANEXO B-3 P. TG_RM_003: ADAPTADOR DE PLACA DOBLE

ANEXO B-4 P. TG_RM_004: BASE PARA SERVO MOTOR

ANEXO B-5 P. TG_RM_005: ARTICULACIÓN MX106T

ANEXO B-6 P. TG_RM_006: ADAPTADOR DE PLACA SIMPLE

ANEXO B-7 P. TG_RM_007: VIGA 127MM

ANEXO B-8 P. TG_RM_008: ARTICULACIÓN MX64T

ANEXO B-9 P. TG_RM_009: VIGA 63.5MM

ANEXO B-10 P. TG_RM_010: ADAPTADOR L

ANEXO B-11 P. TG_RM_011: B. PARA SERVO MOTOR DOBLE

ANEXO B-12 P. TG_RM_012: ARTICULACIÓN PARA PINZA

ANEXO B-13 P. TG_RM_013: PINZA DERECHA

ANEXO B-14 P. TG_RM_014: PINZA IZQUIERDA

ANEXO C PLANOS DE SERVO MOTORES

ANEXO C-1 P. DC_08_B: DC_08_B

ANEXO C-2 P. MX_64T: MX_64T

ANEXO C-3 P. MX_28T: MX_28T

ANEXO D PROSERIES TECHNICAL REFERENCE GUIDE

ANEXO E ABS MATERIAL DATA SHEET

ANEXO F PROGRAMACIÓN EN MATLAB ARCHIVO PTESIS.M

ANEXO G CARACTERÍSTICAS IMPRESORA CINCEL3D PRINTER