



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ROBOT TODO TERRENO, TELE-OPERADO Y DOTADO DE
VISIÓN REMOTA PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE”**

**AUTOR: FIGUEROA CHIRIBOGA, JEAN ALEXANDER
TIUMA CHAFLA, CARLOS ALEXIS**

DIRECTOR: PHD. AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICADO DEL DIRECTOR**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TODO TERRENO, TELE-OPERADO Y DOTADO DE VISIÓN REMOTA PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE”, fue realizado por el señor Figueroa Chiriboga Jean Alexander y el señor Tiuma Chafra Carlos Alexis, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido, por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar a los autores para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 14 de noviembre del 2018

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'W. Aguilar Castillo', written over a horizontal line.

ING. AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY PHD

C.C: 0703844696

DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**ESPE**
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, FIGUEROA CHIRIBOGA JEAN ALEXANDER Y TIUMA CHAFLA CARLOS ALEXIS, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TODO TERRENO, TELE-OPERADO Y DOTADO DE VISIÓN REMOTA PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE”, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de noviembre del 2018

Firma manuscrita de Jean Alexander Figueroa Chiriboga.

Figueroa Chiriboga Jean Alexander

C.C: 1308126422

Firma manuscrita de Carlos Alexis Tiuma Chafra.

Tiuma Chafra Carlos Alexis

C.C: 0603804238

AUTORIZACIÓN**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORIZACIÓN**

Nosotros, FIGUEROA CHIRIBOGA JEAN ALEXANDER y TIUMA CHAFLA CARLOS ALEXIS, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TODO TERRENO, TELE-OPERADO Y DOTADO DE VISIÓN REMOTA PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO CICTE”, en el repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 14 de noviembre del 2018

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser 'Jean Alexander Figueroa Chiriboga', sobre una línea horizontal.

Figueroa Chiriboga Jean Alexander

C.C: 1308126422

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser 'Carlos Alexis Tiuma Chafla', sobre una línea horizontal.

Tiuma Chafla Carlos Alexis

C.C: 0603804238

DEDICATORIAS

Dedico este proyecto a mis padres Edgar y Susana por su esfuerzo, su apoyo incondicional y todo su amor, a mi hermano Paúl por siempre estar presente cuando lo he necesitado, a Paty por estar siempre junto a mí brindándome fuerzas y ánimos para seguir adelante, finalmente dedico este proyecto a todos quienes de una u otra forma me han apoyado.

Jean Figueroa

Dedico este proyecto a mis hermanos Andrew y Jefferson, por ser el motor de mi vida para cumplir mis metas y salir adelante, por todo el amor que me brindan, a ustedes dedico este triunfo.

Alexis Tiuna

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por todo el esfuerzo que día a día realizaron para que culmine con éxito mi carrera universitaria, a Paty por siempre alentarme y motivarme, y a todos mis familiares y amigos quienes de una u otra manera me han apoyado durante el transcurso de mi carrera universitaria. Agradezco además a la Universidad de las Fuerzas Armadas - Espe y sus profesores, a quienes debo todo el conocimiento adquirido y quienes siempre han estado dispuestos a brindar ayuda cuando la he necesitado.

Jean Figueroa

Agradezco a mi Dios y a mi Virgencita por todas sus bendiciones y por guiar cada paso que doy, a mi amado Colegio San Felipe Neri cuya educación me brindó los mejores conocimientos para cumplir esta meta, mil gracias a quienes siempre estuvieron apoyándome y confiaron en mí, juntos lo hemos logrado.

Alexis Tiuma

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I.....	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Justificación e importancia	20
1.3. Área de influencia.....	22
1.4. Objetivos.....	23
1.4.1. Objetivo general	23
1.4.2. Objetivos específicos.....	23
1.5. Alcance del proyecto	24
1.6. Estructura del documento	24

CAPÍTULO II	26
ESTADO DEL ARTE	26
2.1. Vehículos terrestres no tripulados	28
2.1.1. Clasificación de los Vehículos terrestres no tripulados UGV	30
2.1.2. Aplicaciones de los UGV	35
2.1.3. Componentes de un UGV	39
CAPÍTULO III	42
DISEÑO	42
3.1. Metodología del despliegue de la función de calidad	42
3.1.1. Requerimientos de calidad en términos del cliente	43
3.1.2. Actividades del proceso	44
3.1.3. Matriz de correlación entre requerimientos y características técnicas	44
3.2. Módulo 1. Estructura	48
3.2.1. Selección del material para la estructura	49
3.2.2. Subsistema 1. Extremidades	51
3.2.3. Subsistema 2. Chasis	53
3.2.4. Selección de motores	55
3.2.5. Selección de las baterías	58
3.2.6. Diseño de Componentes mecánicos	61
3.2.7. Análisis mecánico del chasis y los brazos	101

3.3. Módulo 2. Locomoción	114
3.3.1. Arquitectura de control.....	114
3.3.2. Tarjeta de control	115
3.3.3. Puente H.....	117
3.3.4. Control de motor	118
3.4. Módulo 3. Monitoreo	118
3.4.1. Subsistema 1. Cámara	119
3.4.2. Subsistema 2. Interfaz	120
3.5. Módulo 4. Tele-operación	126
3.5.1. Subsistema 1. Comunicación	126
3.5.2. Subsistema 2. Mando	126
CAPÍTULO IV	127
IMPLEMENTACIÓN.....	127
4.1. Implementación de componentes mecánicos	127
4.1.1. Construcción de componentes del chasis del robot y brazos	128
4.1.2. Construcción de las ruedas	133
4.1.3. Construcción de ejes.....	135
4.1.4. Construcción de engranajes.....	136
4.2. Proceso de ensamblaje	137
4.3. Implementación de componentes eléctricos y electrónicos	140

4.4. Modelo final	141
CAPÍTULO V	143
PRUEBAS Y RESULTADOS	143
5.1. Métricas de evaluación.....	143
5.1.1. Funcionamiento de motores	143
5.1.2. Capacidad de comunicación.....	144
5.1.3. Autonomía energética	144
5.1.4. Velocidad de movimiento	144
5.2. Diseño del experimento.....	144
5.3. Resultados	145
5.3.1. Pruebas de motores.....	145
5.3.2. Pruebas de comunicación PC-Robot	146
5.3.3. Pruebas de duración de baterías	147
5.3.4. Pruebas de funcionamiento en distintos terrenos	148
5.3.5. Pruebas de velocidad de movimiento.....	151
5.4. Discusión	156
CONCLUSIONES	158
RECOMENDACIONES	161
BIBLIOGRAFÍA.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Listado de requerimientos del prototipo de robot todo terreno</i>	43
Tabla 2 <i>Características técnicas del robot todo terreno</i>	44
Tabla 3 <i>Matriz simbólica de la correlación entre requerimientos y características técnicas</i>	45
Tabla 4 <i>Matriz numérica de la correlación entre requerimientos y características técnicas</i>	46
Tabla 5 <i>Resultados de la matriz QFD</i>	47
Tabla 6 <i>Módulos para el diseño</i>	48
Tabla 7 <i>Opciones de material para la estructura</i>	49
Tabla 8 <i>Ponderación de parámetros para la selección del material de la estructura</i>	50
Tabla 9 <i>Resultados para la selección del material de la estructura</i>	50
Tabla 10 <i>Opciones de motores</i>	56
Tabla 11 <i>Ponderación de parámetros para la selección de motores</i>	56
Tabla 12 <i>Resultados para la selección del motor</i>	57
Tabla 13 <i>Características del motor TSINY TS-40 GZ868-505</i>	58
Tabla 14 <i>Características de las baterías Turnigy XT-90</i>	59
Tabla 15 <i>Características del cargador portátil Sony CP-V10A/WC</i>	60
Tabla 16 <i>Factores de sobrecarga K_o</i>	63
Tabla 17 <i>Constantes empíricas A, B, C</i>	65
Tabla 18 <i>Coeficiente elástico</i>	69
Tabla 19 <i>Parámetros en el factor de la condición superficial de Marín</i>	83
Tabla 20 <i>Factor de confiabilidad K_e</i>	84

Tabla 21 <i>Coefficiente de seguridad según su aplicación</i>	91
Tabla 22 <i>Parámetros de Weibull</i>	92
Tabla 23 <i>Rodamiento DIN 625 6202</i>	95
Tabla 24 <i>Rodamiento DIN 625 6201</i>	96
Tabla 25 <i>Cuñas estándar y tamaños de tornillos prisioneros y métricas para ejes</i>	97
Tabla 26 <i>Potencia de sujeción de tornillos de presión de cabeza hueca</i>	98
Tabla 27 <i>Factores aproximados de concentración de esfuerzos con carga en torsión</i>	100
Tabla 28 <i>Características de la tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B</i>	116
Tabla 29 <i>Características técnicas del puente H BTS7960</i>	117
Tabla 30 <i>Características del Camera Module V2</i>	119
Tabla 31 <i>Características técnicas del modelo final del robot</i>	142
Tabla 32 <i>Parámetros y resultados de pruebas en motores</i>	146
Tabla 33 <i>Parámetros y resultados de pruebas en conexión PC-Robot</i>	146
Tabla 34 <i>Prueba de alcance máximo</i>	147
Tabla 35 <i>Parámetros y resultados de pruebas de duración de baterías</i>	148
Tabla 36 <i>Pruebas de velocidad en terreno de hormigón</i>	152
Tabla 37 <i>Pruebas de velocidad en terreno con césped</i>	153
Tabla 38 <i>Pruebas de velocidad en terreno mixto</i>	154
Tabla 39 <i>Pruebas de velocidad en gradas</i>	155

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Patente 613,809 de Nikola Tesla Radio control	26
<i>Figura 2.</i> Robot todo terreno con sistema Rocker-Bogie	29
<i>Figura 3.</i> Vehículo terrestre no tripulado	31
<i>Figura 4.</i> Robot de orugas TKOT	32
<i>Figura 5.</i> Robot hexápodo	33
<i>Figura 6.</i> iRobot 510 PackBot	34
<i>Figura 7.</i> Robot Spirit.....	35
<i>Figura 8.</i> SwagBot.....	36
<i>Figura 9.</i> UGV Husky	37
<i>Figura 10.</i> Robot Kiva.....	38
<i>Figura 11.</i> Robot stretcher.....	39
<i>Figura 12.</i> Clasificación de escaleras según su pendiente.....	51
<i>Figura 13.</i> Vista lateral del Robot con brazos extendidos.....	52
<i>Figura 14.</i> Posicionamiento de los brazos del robot	53
<i>Figura 15.</i> Posicionamiento del robot sobre las gradas.....	54
<i>Figura 16.</i> Motor TSINY TS-40 GZ868-505	58
<i>Figura 17.</i> Batería Turnigy XT-90	59
<i>Figura 18.</i> Cargador portátil Sony CP-V10A/WC	60
<i>Figura 19.</i> Factor dinámico Kv	64
<i>Figura 20.</i> Factor del espesor del aro KB.....	67

Figura 21. Factores geométricos J de engranajes rectos	68
Figura 22. Factor de modificación	70
Figura 23. Eje de las extremidades del robot	71
Figura 24. Diagrama de esfuerzo cortante y	72
Figura 25. Diagrama de reacciones en el eje del robot	74
Figura 26. Esfuerzo cortante y momento flector en el eje del robot en el plano Y - Z.....	79
Figura 27. Esfuerzo cortante y momento flector en el eje del robot en el plano X - Z.....	81
Figura 28. Eje redondo con filete en el hombro en torsión.....	85
Figura 29. Eje redondo con filete en el hombro en flexión.....	85
Figura 30. Sensibilidad a la muesca en caso de flexión inversa	86
Figura 31. Sensibilidad a la muesca en caso de torsión inversa.....	87
Figura 32. Diseño final del eje para las extremidades	89
Figura 33. Disposición de rodamientos en el eje para de los brazos.....	90
Figura 34. Rodamientos para las extremidades.....	94
Figura 35. Barra redonda con.....	100
Figura 36. Análisis de convergencia del mallado en la estructura.....	102
Figura 37. Tensión de Von Mises para carga aplicada en la cara lateral del chasis	103
Figura 38. Deformación para carga aplicada en la cara lateral del chasis	104
Figura 39. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara lateral del chasis	104
Figura 40. Tensión de von mises para carga aplicada en la cara frontal del chasis	105
Figura 41. Deformación para carga aplicada en la cara frontal del chasis.....	106
Figura 42. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara frontal del chasis	106

Figura 43. Tensión de von mises para carga aplicada en la cara inferior del chasis.....	107
Figura 44. Deformación para carga aplicada en la cara inferior del chasis	108
Figura 45. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara inferior del chasis	108
Figura 46. Análisis de convergencia del mallado en los brazos	109
Figura 47. Tensión de Von Mises para carga lateral aplicada en los brazos del robot	110
Figura 48. Deformación para carga lateral aplicada en los brazos del robot	111
Figura 49. Factor de seguridad para carga lateral aplicada en los brazos del robot.....	111
Figura 50. Tensión de Von Mises para carga aplicada en la cara inferior de los brazos	112
Figura 51. Deformación para carga aplicada en la cara inferior de los brazos del robot.....	113
Figura 52. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara inferior de los brazos del robot .	113
Figura 53. Arquitectura del sistema del vehículo todo terreno	114
Figura 54. Raspberry Pi 3 modelo B	116
Figura 55. Puente H BTS 7960	117
Figura 56. Señales PWM con distintos porcentajes de trabajo	118
Figura 57. Raspberry Pi Camera Module V2.....	119
Figura 58. Ventana de acceso de la interfaz.....	122
Figura 59. Ventana emergente de la interfaz	122
Figura 60. Ventana de operación del usuario.....	123
Figura 61. Ventana de ayuda de la interfaz.....	124
Figura 62. Ventana de visualización del entorno del robot.....	124
Figura 63. Ventana de control.....	125
Figura 64. Ventana de confirmación de salida.....	125

Figura 65. Diagrama de flujo de la implementación del robot	128
Figura 66. Chasis y brazos del robot	129
Figura 67. Proceso de soldadura y taladrado en el chasis y brazos.....	130
Figura 68. Chasis del robot	130
Figura 69. Brazos del robot.....	131
Figura 70. Proceso de taladrado de acoples	132
Figura 71. Componentes fabricados en lámina de aluminio de 3 mm	132
Figura 72. Proceso de pintado	133
Figura 73. Torneado de ruedas.....	134
Figura 74. Rueda de robot.....	134
Figura 75. Rueda montada en eje del brazo del robot.....	135
Figura 76. Eje de los brazos y tornillo de sujeción	135
Figura 77. Proceso de torneado de cilindros para engranajes	136
Figura 78. Engranajes fabricados.....	136
Figura 79. Proceso de roscado interno	137
Figura 80. Ensamblaje del eje y colocación de motores	138
Figura 81. Guías laterales de la estructura y brazos del robot	139
Figura 82. Proceso de ensamblaje de ruedas, bandas y engranaje	139
Figura 83. Instalación de componentes eléctricos y electrónicos	140
Figura 84. Instalación de tarjeta de control, cámara y cableado	141
Figura 85. Modelo final del robot	141
Figura 86. Desplazamiento del robot en terreno horizontal liso	148

Figura 87. Desplazamiento del robot en césped.....	149
Figura 88. Desplazamiento del robot en terreno mixto.....	150
Figura 89. Desplazamiento del robot en gradas	151
Figura 90. Velocidad de movimiento en terreno de hormigón	152
Figura 91. Velocidad de movimiento en terreno de césped	153
Figura 92. Velocidad de movimiento en terreno mixto	154
Figura 93. Velocidad de movimiento en gradas.....	155

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se fundamenta en el diseño y construcción de un prototipo de robot todo terreno, tele-operado, dotado de visión remota, para El Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE). El proyecto posee una coordinación armónica de componentes mecánicos, electrónicos y de control para la obtención del modelo final, que le permite quedar en condiciones de empleo en misiones que constituyan riesgo para el personal militar. La estructura se divide en módulos y el diseño está basado en la cinemática y dinámica del robot. La locomoción ha sido implementada luego de un análisis de diferentes mecanismos donde se ha optado por el más eficiente, basado en engranares y orugas que le ayudan a un mejor desempeño en el terreno en que sea empleado. La tele-operación permite la comunicación entre el operario y la plataforma robótica a través de un módulo inalámbrico que garantiza su funcionalidad. Considerando el nivel de dificultad que representan las tareas en las que el robot será expuesto, el monitoreo y la interfaz humano-máquina le ayudan a adaptarse a estas condiciones y visualizar en tiempo real el entorno en el que se desenvuelve. Las pruebas realizadas en distintos terrenos y ambientes otorgan credibilidad a lo antes expuesto.

PALABRAS CLAVE:

- **PROTOTIPO DE ROBOT**
- **TELEOPERADO**
- **COORDINACIÓN ARMÓNICA**

ABSTRACT

The present work is based on the design of a robot prototype: all-terrain, tele-operated and equipped with remote vision, for "El Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE)". The project coordinates several mechanical, electronic and control components, in order to obtain the final model, allowing to be used on dangerous mission for militaries. The robot structure is separated into modules, and its design is based on the kinematics and dynamics principle. The locomotion has been implemented after analysis of different mechanisms used to obtain an efficient prototype, based on gears and robotic tank platform that achieves the best performance in complex terrains. Teleoperation allows communication between the operator and the robotic platform through a wireless module that guarantees its functionality. Considering the difficult level represented by the future environments where the robot will be exposed, the monitoring and the human-machine interface help the prototype to adapt itself to hard conditions and visualize the operation environment in real time. Finally, the robot prototype is tested in different terrains and environments to prove the robustness.

KEYWORDS:

- **ROBOT PROTOTYPE**
- **TELE-OPERATED**
- **HARMONIC COORDINATION**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El primer capítulo explica la necesidad de la construcción de un robot que sea capaz de atravesar diferentes terrenos que posee la geografía ecuatoriana para aplicaciones en el ámbito militar, que al relevar salvaguarde y garantice la integridad física del personal de las fuerzas armadas. Se justifica la implementación basándose en la importancia de su aplicación y el ámbito en la cual tendrá influencia. Se establecen el objetivo general y objetivos específicos que constituyen la finalidad o alcance del presente proyecto.

1.1. Antecedentes

El personal de militares de fuerzas armadas a nivel mundial ha venido cumpliendo con misiones de reconocimiento y vigilancia de áreas peligrosas, desactivación de minas en distintos terrenos, que constituyen un alto índice de peligro para su integridad física al quedar expuestos a accidentes que su labor conlleva, en ciertas ocasiones hasta lamentar pérdidas humanas o pérdidas de extremidades. Es aquí donde surge la necesidad de relevar toda esta responsabilidad a una plataforma robótica que cumpla tareas de la misma manera que lo hace un soldado, que atravesase terrenos irregulares y sea capaz de subir escaleras, pues estas misiones se presentan en diferentes escenarios.

La necesidad de una base tecnológica considerable en el ámbito civil es requisito imprescindible para una potente industria de defensa, este apoyo del sector Defensa a la base

tecnológica y científica del ámbito civil ha promovido una apertura progresiva de la industria de Defensa a otros sectores, promoviendo la transferencia continua de conocimiento tecnológico entre los dos ámbitos (Riola, 2014). Esto hace referencia al desarrollo tecnológico y beneficios para la institución que se generarían en este caso al utilizar vehículos robóticos no tripulados en el ámbito de defensa nacional.

En el Ecuador, el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE se encarga del estudio, diseño e implementación de proyectos enfocados al área de seguridad y defensa del país, siendo los vehículos terrestres no tripulados una de sus principales ausencias dentro de sus investigaciones, por lo que se requiere incursionar en el ámbito de los mismos para contribuir con su desarrollo.

Con la finalidad de impulsar el desarrollo tecnológico del Ejército Ecuatoriano nuestro proyecto propone diseñar e implementar un robot todo terreno, tele-operado y dotado de visión remota para múltiples operaciones a las cuales sea adaptado, evitando exponer al personal militar a posibles amenazas que pongan en peligro su integridad física.

1.2. Justificación e importancia

Existen situaciones y escenarios donde no es conveniente emplear personal militar debido al riesgo al cual se exponen para el cumplimiento de determinadas operaciones como el reconocimiento de áreas peligrosas, vigilancia de áreas o sectores de interés para la fuerza, desactivación de minas o bombas que constituyen un alto riesgo para su integridad física, llegando en ocasiones a terminar con su vida o a dejarlos incapacitados. Es por esto que se han

desarrollado plataformas robóticas como vehículos terrestres no tripulados que pueden cumplir funciones de inspección de zonas, desactivación de explosivos, transporte de cargas, tareas de búsqueda, rescate, vigilancia, etc., que permiten relevar a los soldados de la responsabilidad y peligro que implica su trabajo.

La industria ha desarrollado varios vehículos terrestres no tripulados (UGV) diseñados para aplicaciones comerciales, industriales, de seguridad o para exploración de entornos hostiles, y son una línea de investigación presente en muchos laboratorios y centros tecnológicos. Cada diseño tiene una configuración diferente del chasis de soporte del vehículo, sistema de transmisión de movimiento, efector final, soporte para el efector final, sistema de control, etc. Todos estos factores dependen directamente del empleo que se le dé al robot.

El presente proyecto se enfocará en un robot con fines militares, realizando el diseño y la construcción de un prototipo de vehículo terrestre todo terreno, no tripulado, multiuso, dotado de visión remota, el cual tiene como objetivo permitir al ejército realizar misiones de riesgo salvaguardando la integridad física del personal. El diseño se acoplará a dimensiones que garanticen un mejor empleo y funcionalidad, a fin de satisfacer los requerimientos del CICTE.

El robot estará compuesto por elementos mecánicos y electrónicos que mejor se adapten a su trabajo, garantizando un correcto desplazamiento y evasión de obstáculos, para lo cual la transmisión del movimiento de los motores hacia los mecanismos debe ser robusta, con el fin de que pueda atravesar todo tipo de terreno.

Se podrá controlar remotamente mediante el uso de una HMI que a su vez permitirá al operador visualizar el entorno del robot mediante un sistema de visión remota.

El diseño estará basado en una estructura modular para la incorporación futura de equipos de reconocimiento y vigilancia de áreas de importancia, operando con efectividad en tareas a las cuales sea encargado. Mediante la inclusión de este robot como herramienta que ejecute misiones peligrosas en áreas hostiles se logrará disminuir el número de accidentes en el personal militar al realizar operaciones que representen peligro para su vida. Además, se presentarán planos y una memoria de cálculo de su diseño y construcción.

1.3. Área de influencia

El robot todo terreno a través de su implementación pretende impulsar el desarrollo tecnológico del Ejército Ecuatoriano dotando de innovaciones científicas que garanticen su soberanía e impulsen su progreso institucional. Su área de influencia es el territorio ecuatoriano en las operaciones de defensa interna y externa, apoyado por el Centro de Investigaciones Científicas y tecnológicas del Ejército (CICTE) ubicado en la Av. General Rumiñahui S/N, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Valle de los Chillos, parroquia de Sangolquí, cantón Rumiñahui, provincia Pichincha. En coordenadas Latitud: 0° 19' 7.50" Sur y Longitud: 78° 26' 50" Oeste.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un robot todo terreno, tele-operado, dotado de visión remota adaptable a aplicaciones militares para el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército (CICTE).

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar la estructura mecánica del robot que le permita evadir obstáculos, maniobrar en distintos terrenos y subir escaleras.
- Definir e implementar los componentes electrónicos adecuados para el funcionamiento correcto del sistema.
- Implementar un interfaz humano máquina amigable para la interacción remota con el robot.
- Implementar en el HMI un sistema de visión remota que permita visualizar el entorno donde opera el robot.

1.5. Alcance del proyecto

El prototipo de robot estará conformado por un chasis que para su traslación contará con poleas dentadas acopladas a orugas que ayudarán a mejorar su tracción a fin de atravesar diferentes terrenos. En la parte frontal tendrá dos extremidades (brazos) con un grado de libertad cada uno que le ayudarán al posicionamiento de toda su estructura en caso de encontrarse con obstáculos. Será operada a distancia mediante una interfaz humano-máquina (HMI), y con la ayuda de una cámara que le proporcione visión remota permitirán al robot la exploración e inspección de áreas de difícil acceso.

1.6. Estructura del documento

El desarrollo del documento se encuentra conformado por cinco capítulos. El primer capítulo consta de una introducción al desarrollo del proyecto especificando el origen del problema y motivando a la búsqueda de una solución. Se justifica la importancia de su implementación, y se establece el objetivo general y los objetivos específicos.

En el segundo capítulo se realizará el estado del arte mediante el análisis de trabajos que se han desarrollado en la actualidad y que tienen similitud al presente proyecto. Se detalla las características, clasificación, y componentes con que están hechos cada uno de los diseños que ha implementado la industria hasta la actualidad.

El tercer capítulo constituirá el diseño mecatrónico del proyecto en el cual se empleará el método del despliegue de la función de calidad (QFD), que servirá para establecer las características técnicas más relevantes, las mismas que se agruparán en módulos que a su vez se

dividirán en subsistemas cumpliendo operaciones funcionales que satisfagan las principales necesidades del cliente. La finalidad de lo mencionado anteriormente es para la adecuada obtención de componentes mecánicos, electrónicos y de control con que contará el robot todo terreno.

En el cuarto capítulo constará la integración del sistema, basado en la coordinación armónica de componentes mecánicos, electrónicos y de control para la obtención del modelo final del prototipo de robot, quedando en condiciones óptimas de ser empleado en misiones que constituyan peligro para la integridad del personal de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

En el quinto capítulo se detallarán los resultados del banco de pruebas realizados con el robot, los mismos que garanticen su correcto funcionamiento al ser empleado en los diferentes terrenos con que cuenta la geografía ecuatoriana. Además, se presentarán conclusiones y recomendaciones logradas a partir de la implementación del presente proyecto.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo es un resumen de estudios recientes realizados sobre vehículos terrestres no tripulados. Se realizará un análisis de la configuración, características, clasificación, y componentes con que están implementados cada diseño que tiene similitud con el proyecto.

Nikola Tesla a finales del siglo XIX logró el control a distancia de un bote que estaba situado en un estanque (ver Figura 1), controlándolo a través ondas de radio lo que luego se convertiría en el nacimiento de la robótica moderna, constituyéndose en un enorme avance militar en aquella época (Delgado, 2016).

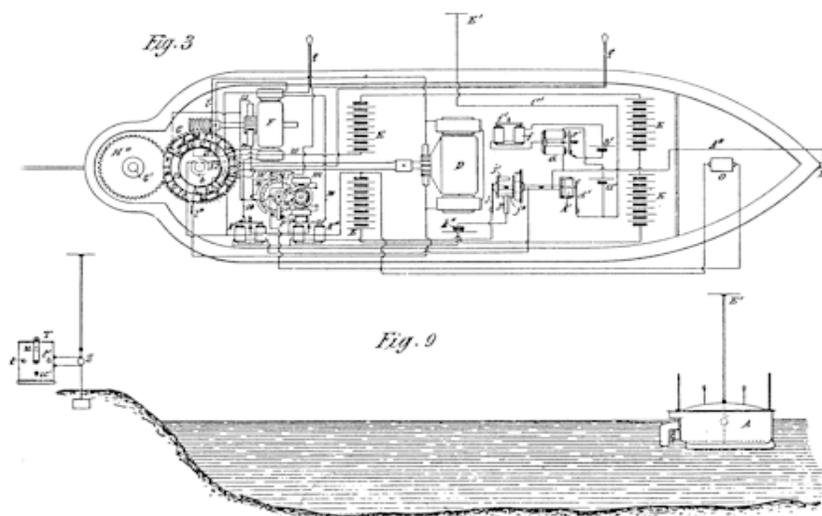


Figura 1. Patente 613,809 de Nikola Tesla Radio control
Fuente: (21st Century Book, 2001)

Hace algunos años, investigadores a través de avances tecnológicos han buscado facilitar el trabajo del hombre, utilizando un robot en tareas que requieren un alto nivel de esfuerzo físico,

fuerza, precisión, o representan peligro para su integridad, cumpliendo el objetivo con la misma eficiencia que un humano (Bambino, 2008), (Ullero, 2001).

En la actualidad la ciencia ha logrado tener una mejora en las telecomunicaciones y en el control de objetos permitiendo desarrollar nuevas tecnologías que facilitan el diseño e implementación de plataformas robóticas, estos avances se encuentran al alcance del público como material de estudio o investigación (Bambino, 2008).

Las aplicaciones de los vehículos terrestres no tripulados se evidencian en industrias como la automotriz, médica, agropecuaria, nuclear, bélica, laboratorios, etc., El desarrollo de material bélico es de gran importancia en la industria armamentista en países desarrollados, con gran acogida y con un presupuesto económico alto designado para la seguridad y defensa de su soberanía como nación (López & Isorna, 2014).

La industria bélica está encargada de la fabricación de armas, municiones, y tecnología militar que contribuya a la defensa y al desarrollo tecnológico armamentista. Algunos aportes científicos están enfocados al diseño y construcción de Vehículos no tripulados, que mediante su operación buscan cumplir misiones como: reconocimiento y vigilancia en áreas de importancia, desactivación de artefactos explosivos, detección de minas, transporte de material bélico etc., evitando que el personal militar tenga intervención directa en situaciones de peligro que en muchas ocasiones ha causado pérdidas de extremidades de soldados o incluso la muerte.

Seyfi & Akbulut (2014), clasifica a los vehículos no tripulados en:

- Vehículos terrestres no tripulados (UGV Unmanned ground vehicle)
- Vehículos aéreos no tripulados (UAV Unmanned aerial vehicle)

- Vehículos marinos no tripulados (USV Unmanned surface vehicle)
- Vehículos submarinos no tripulados (UUV Unmanned underwater vehicle)

2.1. Vehículos terrestres no tripulados

En la última década se ha pasado del desconocimiento de los vehículos terrestres no tripulados hasta tenerlos por varios lados en la actualidad, cumpliendo diversas funciones dependiendo del campo en el cual son empleados. Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) son plataformas robóticas versátiles que mediante su diseño facilitan misiones en lugares en donde exista riesgo para el hombre, como es el caso de una emergencia biológica, química o en sitios con amenaza explosiva. Su estructura cuenta con actuadores, sensores, elementos mecánicos y electrónicos, etc., que le otorgan capacidad de movimiento, tele-operación y empleo en diferentes terrenos (Embention, 2016).

Actualmente los avances tecnológicos en cuanto a vehículos todo terreno tele-operados desarrollados en el país han sido limitados, siendo uno de los trabajos más notorios en este ámbito el realizado por un estudiante de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” en el año 2014 (ver Figura 2), el cual utilizó el sistema Rocker-Bogie para atravesar distintos terrenos, siendo las principales contras de este modelo el gran tamaño y la falta de solidez en la estructura implementada (Quezada, 2014).



Figura 2. Robot todo terreno con sistema Rocker-Bogie
Fuente: (Quezada, 2014)

Uno de los proyectos del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército es el MultiNavCar que busca el desarrollo de un vehículo terrestre no tripulado para misiones de reconocimiento y vigilancia con fines militares, a fin de precautelar la integridad física del personal por posibles accidentes que conllevan el riesgo de estas operaciones.

Otro trabajo relevante fue el realizado por un estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador “UPS” en el año 2012 el cual se desarrolló como apoyo en operaciones de alto riesgo en el Cuerpo de Bomberos, este modelo utilizó tracción mediante ruedas siendo esta su principal desventaja pues no es capaz de atravesar obstáculos como gradas (Argudo & Arpi, 2012).

2.1.1. Clasificación de los Vehículos terrestres no tripulados UGV

Varios modelos de UGV han sido implementados en el mercado, estos difieren en cuanto a su hardware y software influyendo directamente en el precio en el cual se los comercializa. Tienen la capacidad de evadir obstáculos y cruzar terrenos no estructurados dependiendo de su locomoción (configuración).

2.1.1.1. Mediante Ruedas

Presentan un menor consumo energético, diseño mecánico fácil y máxima eficiencia como principales características. Entre sus principales modelos están los de tipo triciclo o de tres ruedas, Ackerman o de cuatro ruedas y de ruedas omnidireccionales. Su desventaja está en la inoperatividad en terrenos no estructurados ya que el área de contacto entre el suelo y las ruedas es pequeña, además de no poder atravesar obstáculos mayores al diámetro de la rueda.

El vehículo de tipo Ackerman es semejante a la dirección convencional de un automóvil de cuatro ruedas (ver Figura 3), permite girar en diferentes direcciones a las ruedas, quedando perpendiculares al radio de giro al que fue sometido el automóvil. Su estructura es el resultado de la modificación de automóviles tradicionales (Cerón, 2005).



Figura 3. Vehículo terrestre no tripulado

Fuente: (Embention, 2016)

2.1.1.2. Mediante pistas deslizantes

Son diseñados para eliminar el problema que presentan los robots de ruedas. Su sistema es fácil de controlar y su característica principal es la oruga (ver Figura 4) que le brinda mayor área de contacto con el suelo aumentando su tracción, facilitando su operación en terrenos no estructurados, subir pendientes inclinadas y gradas.

La desventaja de este diseño es el alto consumo energético y velocidad limitada, además de presentar resultados pobres en odometría.

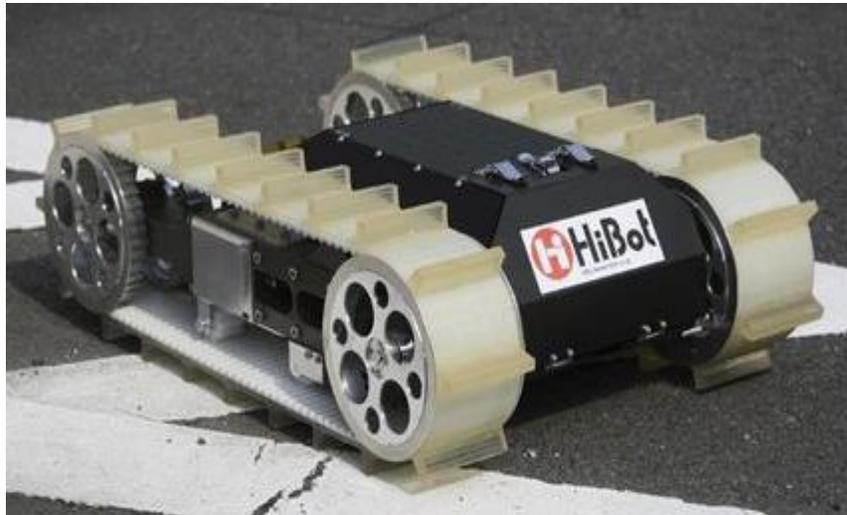


Figura 4. Robot de orugas TKOT
Fuente: (Direct Industry)

2.1.1.3. Mediante extremidades

Su locomoción ha sido basada en el movimiento de los animales, cuya característica principal es la movilidad y adaptabilidad en diferentes terrenos (ver Figura 5). Dentro de sus ventajas está la capacidad de evadir de obstáculos y su estructura omnidireccional.

Las desventajas que presenta este diseño son su alto consumo energético, diseño mecánico complicado, movimientos lentos y un sistema de control complejo.



Figura 5. Robot hexápodo
Fuente: (Arqhys, 2012)

2.1.1.4. Configuración híbrida

También denominados multi-modales, son configuraciones que se han desarrollado en los últimos años a partir de la unión de dos sistemas de locomoción para satisfacer la demanda de vehículos terrestres no tripulados capaces de cruzar terrenos irregulares. Se ha generado cuatro sistemas de locomoción:

- Extremidades con ruedas (L-W, Legs-wheels)
- Extremidades con orugas (L-T, Legs-tracks)
- Ruedas con orugas (W-T, Wheels-tracks)
- Extremidades con ruedas y orugas (L-W-T, Legs-wheels_tracks) (Arias & García, 2016).

Un ejemplo de vehículos terrestres no tripulados de configuración híbrida desarrollados para aplicaciones militares es el robot de desactivación de explosivos iRobot 510 PackBot (ver Figura 6), cuya principal función es la limpieza de minas en países que han sufrido guerras y están en reconstrucción (Army Technology).

Características técnicas:

- Robot móvil táctico multi-misión.
- Longitud de 68.6 cm con aletas guardadas y 88.9 cm con aletas extendidas.
- Altura de 17.8cm sin carga útil, ancho de 52.1cm con aletas.
- Pesa aproximadamente 10.89 kg sin baterías.
- Posee una cámara de disco angular con torreta ajustable con zoom de 312x.
- Posee Manipulator 1.0 (510 3-Link Arm) para inspeccionar materiales peligrosos.



Figura 6. *iRobot 510 PackBot*
Fuente: (Army Technology)

2.1.2. Aplicaciones de los UGV

2.1.2.1. Aplicaciones Espaciales

Actualmente la Nasa tiene una misión espacial denominada Exploración de Marte en donde emplea a dos vehículos terrestres no tripulados denominados Spirit que en el año 2010 dejó de funcionar y Opportunity (ver Figura 7) que aún sigue activo. En un principio ambos estuvieron encargados de realizar geología de campo y operaciones atmosféricas. Tenían una implementación idéntica y contaban con sofisticados instrumentos científicos, con la finalidad de hallar evidencia de condiciones espaciales habitadas (Nasa).



Figura 7. Robot Spirit
Fuente: (Nasa)

2.1.2.2. Agricultura

La agricultura es una industria de mucha importancia para el hombre ya que se encarga de proporcionar los principales insumos alimenticios. Por tal motivo la tecnología ha desarrollado plataformas robóticas que facilitan las actividades de la agricultura como el roseado de plaguicidas o recolección de cosecha.

La universidad de Sydney ha creado a Swagbot (ver Figura 8), un robot de cuatro ruedas que tiene la capacidad de controlar granjas ganaderas. Posee un diseño multidireccional capaz de atravesar todo terreno.



Figura 8. SwagBot
Fuente: (Underwood & Burnett, 2017)

2.1.2.3. Minería

La industria minera cumple actividades que involucran un alto índice de accidentes laborales y requiere mayor esfuerzo físico del personal de operarios. Es por eso que los investigadores han desarrollado soluciones que minimizan el empleo de mano de obra mediante el uso de vehículos no tripulados como taladros, trenes, camiones, etc., expandiendo sus operaciones a minas más desafiantes y remotas (Gerens, 2018).

Clearpath Robotics ha desarrollado un vehículo terrestre no tripulado denominado Husky (ver Figura 9) que se emplea en tareas de la minería. Su diseño modular hace posible la integración de cámaras, LIDAR, GPS, posee un alto torque que le permite operar en terrenos no estructurados y de difícil acceso.



Figura 9. UGV Husky
Fuente: (Charron, 2017)

2.1.2.4. Cadena de suministro

En almacenes de gran escala encargados del almacenamiento, distribución y comercialización de productos las plataformas robóticas no tripuladas ayudan a facilitar las actividades de carga y descarga de objetos, optimizando tiempo y empleando menos recursos.

Kiva Systems ha desarrollado robots que operan en la compañía estadounidense Amazon transportando paquetes hasta los empleados (ver Figura 10), para que estos los recojan, empaqueten y almacenen de manera que se logre reducir costes y tiempos de envío que en su red de almacenes (Tilves, 2012).



Figura 10. Robot Kiva
Fuente: (James, 2014)

2.1.2.5. Militar

Han sido diseñados para realizar trabajos en el ámbito militar (ver Figura 11) proporcionando una movilidad potente para múltiples propósitos.



Figura 11. Robot stretcher
Fuente: (Brown, 2017)

2.1.3. Componentes de un UGV

Están compuestos por elementos mecánicos, electrónicos y de control, trabajando en una coordinación armónica que hace posible su funcionamiento, entre los principales componentes tenemos:

2.1.3.1. Control

El control del comportamiento del robot se logra gracias al empleo de microcontroladores embebidos en placas de variadas marcas comerciales que constituye el cerebro de la plataforma robótica, permitiéndole ejecutar órdenes previamente programadas por el usuario. Son de múltiple propósito porque son programables (Aguilera & Bautista, 2007).

2.1.3.2. Comunicación

Los sistemas de comunicación inalámbrica cumplen un papel importante para la transmisión de datos, audio y video, permitiendo la interacción entre un emisor y receptor sin necesidad de cableado ideal para plataformas robóticas. Dependiendo de la aplicación en que se vaya a emplear el robot la comunicación se puede utilizar vía radiofrecuencia o infrarrojo (Fields, 2013).

2.1.3.3. Estructura y chasis

El diseño mecánico de la estructura y el chasis del vehículo no tripulado depende del uso a futuro, pues estos se encargan de alojar y dar soporte a todos los componentes que forman parte del UGV (Aguilera & Bautista, 2007).

2.1.3.4. Actuador

Es un elemento mecánico que teniendo como fuente de alimentación la presión hidráulica, neumática, o una fuerza electromotriz son capaces de provocar un efecto para activar un proceso automatizado. Dependiendo de la aplicación pueden ser lineales o rotatorios (Ullero, 2001).

2.1.3.5. Interfaz hombre máquina

Es la herramienta que maneja un operario para supervisar, controlar y optimizar el proceso que lleva a cabo un sistema automatizado. Básicamente constituye un panel gráfico que emplea un operador para intervenir de manera directa en el proceso. Existen diferentes softwares que permiten el diseño de una interfaz humano-máquina cuya la selección depende de su aplicación (Ponsa, Díaz, & Catalá).

CAPÍTULO III

DISEÑO

En el tercer capítulo se representa el desarrollo de las etapas del trabajo de investigación, que tienen como fundamento la metodología del despliegue de la función de calidad (QFD), hasta obtener un prototipo final. La totalidad del diseño implementado está establecido por módulos. El diseño de la estructura está orientado en base a la cinemática y dinámica del robot hasta la selección de los materiales de cada una de las partes que conforman el mismo. La locomoción está implementada mediante un análisis del mecanismo más eficiente y eficaz basado en engranajes y orugas que permitirá un mejor desempeño en el terreno en que sea empleado. La tele-operación representa la comunicación a través de un módulo inalámbrico a utilizar, que garantice la mejor funcionalidad del robot. El monitoreo se adapta a la complejidad de las futuras operaciones militares que cumplirá el robot, así como también se diseña una interfaz humano-máquina que permita visualizar el entorno en el que se desenvuelve. Como producto del capítulo se obtiene un modelo final del robot junto a características técnicas de cada uno de sus componentes que cumplan con los objetivos establecidos para su desarrollo.

3.1. Metodología del despliegue de la función de calidad

Se empleó la metodología del diseño de la función de calidad (QFD, por sus siglas inglesas) basado en el documento de trabajo de Yacuzzi & Martín (2003), que ayuda a establecer método a emplear en la planificación, diseño y construcción del sistema robótico. Como resultado

se obtendrá una matriz de calidad, en la cual se describen las necesidades del Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército y las características técnicas con las que cuenta el proyecto.

3.1.1. Requerimientos de calidad en términos del cliente

Este es un análisis que abarca las necesidades o requerimientos del proyecto que se va a implementar, de manera que el personal interesado en su elaboración ponderará la importancia de cada una de ellas (en una escala comprendida del 1 al 5, siendo el 1 el valor de menor importancia y 5 su valor de máxima importancia). Cada requerimiento del prototipo de robot todo terreno se enlista a continuación (ver Tabla 1):

Tabla 1

Listado de requerimientos del prototipo de robot todo terreno

Nº	REQUERIMIENTOS	PRIORIDAD
1	Precio bajo	3
2	Capacidad de subir gradas	5
3	Empleo en todoterreno	5
4	Robusto	4
5	Componentes de fácil adquisición	4
6	Velocidad de movimiento adecuada	3
7	Diseño resistente	4
8	De fácil operación	3
9	Adecuada duración de la batería	4
10	De fácil mantenimiento	3
11	Facilidad para su transporte	2
12	Operación remota	5
13	Liviano	3
14	Versátil	4
15	De fácil reparación	4

3.1.2. Actividades del proceso

En una propuesta ingenieril basada en características técnicas del cómo se va a satisfacer las necesidades del cliente para garantizar un excelente producto o servicio (ver Tabla 2).

Tabla 2

Características técnicas del robot todo terreno

Nº	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
1	Dimensionamiento correcto de motores
2	Empleo de software conforme a las necesidades
3	Adecuada comunicación entre controladores
4	Buen diseño del robot y sus componentes
5	Materiales acordes a las necesidades
6	Diseño adecuado de los mecanismos de movimiento
7	Diseño eficiente del circuito de control
8	Diseño adecuado de la HMI
9	Procesos de manufactura adecuados

3.1.3. Matriz de correlación entre requerimientos y características técnicas

Es un análisis de la relación que existe entre los requerimientos o necesidades que presenta el cliente y las características técnicas con las cuales contará el proyecto (ver Tabla 3), lo cual se lo realiza en las condiciones de evaluación siguientes:

- Θ : Relación fuerte
- O: Relación media
- Δ : Relación débil
- Espacio en blanco: Sin relación

Tabla 3

Matriz simbólica de la correlación entre requerimientos y características técnicas

REQUERIMIENTOS	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS								
	Dimensionamiento correcto de motores	Empleo de software conforme a las necesidades	Adecuada comunicación entre controladores	Buen diseño del robot y sus componentes	Materiales acordes a las necesidades	Diseño adecuado de los mecanismos de movimiento	Diseño eficiente del circuito de control	Diseño adecuado de la HMI	Procesos de manufactura adecuados
Precio bajo	⊕	⊕	○	○	⊕				⊕
Capacidad de subir gradas	⊕		△	⊕	△	⊕	○		△
Empleo en todoterreno	⊕	△	○	⊕	○	⊕	○	△	○
Robusto	⊕	⊕	⊕	⊕	○	⊕	⊕	○	○
Componentes de fácil adquisición	⊕	△	△	○	⊕	△			
Velocidad de movimiento adecuada	⊕	△	△	○	△	○	○	△	
Diseño resistente				⊕	⊕	○			⊕
De fácil operación	△	○				△	○	⊕	
Adecuada duración de la batería	⊕	△	△		△	○	○	△	
De fácil mantenimiento				⊕	○	○			⊕
Facilidad para su transporte	△			△	⊕	○			△
Operación remota		○	⊕	△		○	○	⊕	
Liviano	○			○	○	△			○
Versátil	△	△	○	⊕	○	⊕	△		○
De fácil reparación	○			⊕	⊕	○	△		○

Al reemplazar la ponderación simbólica por la numérica, la matriz queda de la siguiente manera (ver Tabla 4).

Tabla 4

Matriz numérica de la correlación entre requerimientos y características técnicas

REQUERIMIENTOS	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS									
	PRIORIDAD	Dimensionamiento correcto de motores	Empleo de software conforme a las necesidades	Adecuada comunicación entre controladores	Buen diseño del robot y sus componentes	Materiales acordes a las necesidades	Diseño adecuado de los mecanismos de movimiento	Diseño eficiente del circuito de control	Diseño adecuado de la HMI	Procesos de manufactura adecuados
Precio bajo	3	9	9	3	3	9	0	0	0	9
Capacidad de subir gradas	5	9	0	1	9	1	9	3	0	1
Empleo en todoterreno	5	9	1	3	9	3	9	3	1	3
Robusto	4	9	9	9	9	3	9	9	3	3
Componentes de fácil adquisición	4	9	1	1	3	9	1	0	0	0
Velocidad de movimiento adecuada	3	9	1	1	3	1	3	3	1	0
Diseño resistente	4	0	0	0	9	9	3	0	0	9
De fácil operación	3	1	3	0	0	0	1	3	9	0
Adecuada duración de la batería	4	9	1	1	0	1	3	3	1	0
De fácil mantenimiento	3	0	0	0	9	3	3	0	0	9
Facilidad para su transporte	2	1	0	0	1	9	3	0	0	1
Operación remota	5	0	3	9	1	0	3	3	9	0
Liviano	3	3	0	0	3	3	1	0	0	3
Versátil	4	1	1	3	9	3	9	1	0	3
De fácil reparación	4	3	0	0	9	9	3	1	0	3
Ponderación total de cada característica técnica		282	107	133	307	222	247	119	96	157
Orden de importancia		2	8	6	1	4	3	7	9	5

Al correlacionar la necesidad del cliente con cada característica técnica y al establecer una ponderación adecuada, nos da como resultado un orden de importancia para la solución del problema (ver Tabla 5).

Tabla 5
Resultados de la matriz QFD

HITOS	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	PORCENTAJE DE PONDERACIÓN
1	Buen diseño del robot y sus componentes	18,38
2	Dimensionamiento adecuado de motores	16,88
3	Materiales acordes a las necesidades	14,79
4	Diseño adecuado de los mecanismos de movimiento	13,29
5	Procesos de manufactura adecuados	9,40
6	Adecuada comunicación entre controladores	7,96
7	Empleo de software conforme a las necesidades	7,12
8	Correcto diseño de la HMI	6,40
9	Diseño eficiente del circuito de control	5,78

Luego de ponderar las características técnicas se tiene como resultado de mayor importancia el buen diseño del robot y sus componentes junto al dimensionamiento adecuado de motores, ya que influyen directamente en los requerimientos más significativos del proyecto los cuales establecen que el robot deberá subir gradas y tendrá un empleo todoterreno, para lo cual el torque de los motores debe ser el necesario para cumplir esta función y el diseño del mismo debe facilitar su traslación. La tercera característica mayor ponderada es el uso de materiales acorde a las necesidades, esta influye directamente en el peso, al diseño resistente y a su precio, satisfaciendo estas necesidades. Las características técnicas en su totalidad cumplen con todos los requerimientos establecidos por parte del cliente, en este caso el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército.

Una vez obtenidos los resultados de la matriz de la función de la calidad se agrupan por módulos, estos estarán conformados por subsistemas que desempeñarán funciones operacionales para el cumplimiento de hitos (ver Tabla 6), para conformar un diseño integral del robot.

Tabla 6
Módulos para el diseño

N°	MÓDULO	SUBSISTEMA	FUNCIÓN	HITOS A CUMPLIR
1	Estructura	Extremidades	Posicionamiento sobre obstáculos	1, 2, 4, 8
		Chasis	Integra componentes del vehículo y aporta sostén y rigidez	1,3, 5
2	Locomoción	Locomoción	Movimiento todo terreno del vehículo	1, 2, 4, 5,9
3	Monitoreo	Cámara	Transmisión de video en tiempo real del entorno	7,8
		Interfaz	Comunicación humano – máquina	7, 8
4	Tele-operación	Comunicación	Transmisión y recepción de señales	6, 7
		Mando	Tele-operación del robot	1, 6, 7, 8

3.2. Módulo 1. Estructura

En el mercado existen robots comerciales con las características similares a las de este proyecto como es el caso del PackBot de la empresa iRobot, este robot mide 17.8 cm de alto, 52.1 cm de ancho y 88.9cm de largo con los brazos extendidos, además tiene un peso de 10.89 Kg sin incluirlas baterías. En el presente proyecto se estableció que las dimensiones máximas

deberían ser 11 cm de altura, 55 cm de ancho y 80 cm de largo con los brazos extendidos, además el peso máximo establecido es 15 Kg (iRobot, 2018).

3.2.1. Selección del material para la estructura

Se elabora una selección de materiales que pueden ser utilizados para la elaboración de la estructura del robot los cuales se presentan a continuación (ver Tabla 7).

Tabla 7
Opciones de material para la estructura

N°	MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
A	Aluminio	Precio alto
		Resistencia ultima 125 Mpa
		Resistencia a la fluencia 55 Mpa
		Densidad 2699 kg/m ³
B	Acero	Precio medio
		Resistencia Última 320 Mpa
		Resistencia a la fluencia 180 Mpa
		Densidad 7860 kg/m ³
C	Acero inoxidable	Resistencia a la tracción 520 Mpa
		Resistencia a la flexión 200 Mpa
		Densidad 7980 kg/m ³

Se determina el porcentaje de ponderación en función de la importancia de cada parámetro importante del material (ver Tabla 8). El valor 0 indica que un parámetro no es más importante que otro, 2.5 indica que ambos parámetros tienen igual importancia y el valor 5 indica que un parámetro es más importante que otro.

Tabla 8*Ponderación de parámetros para la selección del material de la estructura*

PARÁMETRO	Propiedades mecánicas	Facilidad de soldadura	Maquinabilidad	Costo	PESO	$\Sigma+1$	%
Propiedades mecánicas	-	2.5	0	5	0	8.5	15,45
Facilidad de soldadura	2.5	-	0	5	2.5	11	20
Maquinabilidad	5	5	-	2.5	0	13.5	24,54
Costo	0	0	2.5	-	0	3.5	6,36
Peso	5	2.5	5	5	-	18.5	33,6
Total						55	100

Se realiza una matriz en la cual se comparan las diferentes alternativas de solución con un parámetro específico del material. El valor 1 indica que el material es bueno en el respectivo parámetro, el valor 3 indica que es muy bueno y el valor 5 indica que es excelente (ver Tabla 9).

Tabla 9*Resultados para la selección del material de la estructura*

PARÁMETRO	% de importancia	Aluminio		Acero		Acero Inoxidable	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Propiedades mecánicas	15,45	3	0,46	3	0,46	5	0,773
Facilidad de soldadura	20	3	0,6	5	1	5	1
Maquinabilidad	24,54	5	1,23	1	0,25	1	0,245
Costo	6,363	5	0,32	3	0,19	1	0,064
Peso	33,63	5	1,68	1	0,34	1	0,336
		Total	4,29	Total	2,24	Total	2,418

El material más adecuado para la implementación de este proyecto es el aluminio, principalmente por su bajo peso, buenas características de resistencia y fácil Maquinabilidad.

3.2.2. Subsistema 1. Extremidades

El diseño del vehículo terrestre no tripulado cuenta con dos extremidades (brazos) delanteras que le ayudan a posicionarse sobre el obstáculo que encuentre en su camino, de manera que toda la estructura adopte el ángulo de inclinación necesario para evadirlo y continuar su trayectoria.

El robot será capaz atravesar diferentes terrenos, y de subir gradas con ángulos de inclinación de hasta 42° , pues la inclinación usual en gradas de viviendas, comercios, oficinas, etc., está entre 26° y 42° (ver Figura 12). Para cumplir estas funciones hace uso de tres motores DC, uno de los cuales eleva los brazos robóticos a fin de posicionar al robot sobre las gradas y los otros dos motores transmiten el movimiento a las bandas que desplazan al robot sobre la superficie.

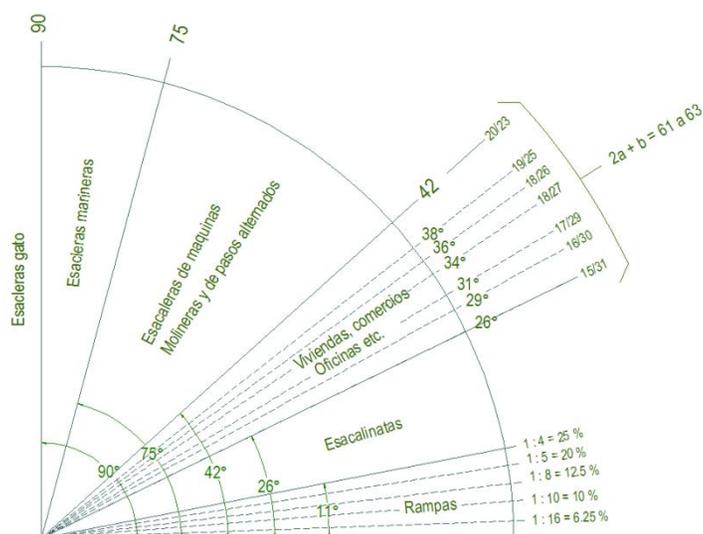


Figura 12. Clasificación de escaleras según su pendiente

Fuente: (Eleve, 2011)

3.2.2.1. Dimensionamiento del motor

El motor que levanta los brazos del robot debe producir un torque superior al generado por el peso de dichos brazos, que le permita romper la inercia y lograr el movimiento deseado. El peso estimado de los dos brazos y todos sus componentes es de 2.6 kg. Para el cálculo del torque necesario se analiza la posición más crítica la cual es con los brazos en posición horizontal (ver Figura 13).

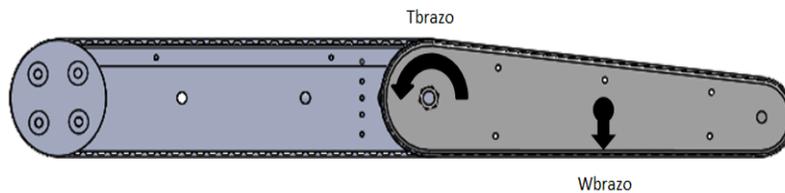


Figura 13. Vista lateral del Robot con brazos extendidos

Ecuación 1 Torque de los brazos del robot

$$T_{brazos} = (\text{Número de brazos}) * (W_{brazo}) * (\text{Distancia al centro de masa})$$

$$T_{brazos} = (2) * (1.3 \text{ Kg}) * (17,5\text{cm})$$

$$T_{brazos} = 45.5 \text{ Kg cm}$$

Ecuación 2 Torque del motor para los brazos del robot

$$T_{motor \text{ de brazos}} = (T_{brazos}) * (1/\text{Eficiencia del motor})$$

$$T_{motor \text{ de brazos}} = (45.5 \text{ Kg cm}) * (1/75\%)$$

$$T_{motor \text{ de brazos}} = 60.67 \text{ Kg cm}$$

3.2.3. Subsistema 2. Chasis

El diseño del vehículo terrestre no tripulado cuenta con un chasis que le permite acoger y fijar en la posición adecuada a todos sus componentes mecánicos y electrónicos para su funcionamiento.

El robot se empleará en terrenos no estructurados y subirá gradas. El posicionamiento sobre las gradas se realizará con ayuda de los brazos (ver Figura 14), la posición de mayor esfuerzo para los motores que mueven toda la estructura es cuando el robot se encuentra completamente sobre las gradas (ver Figura 15).

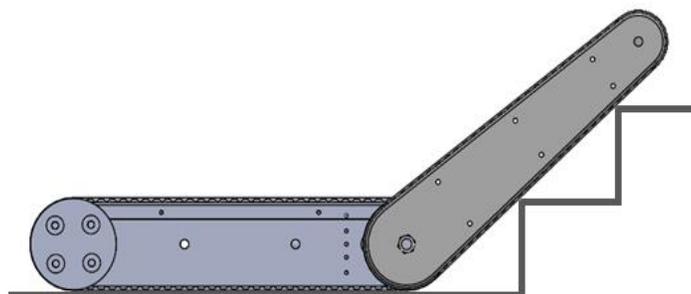


Figura 14. Posicionamiento de los brazos del robot sobre las gradas

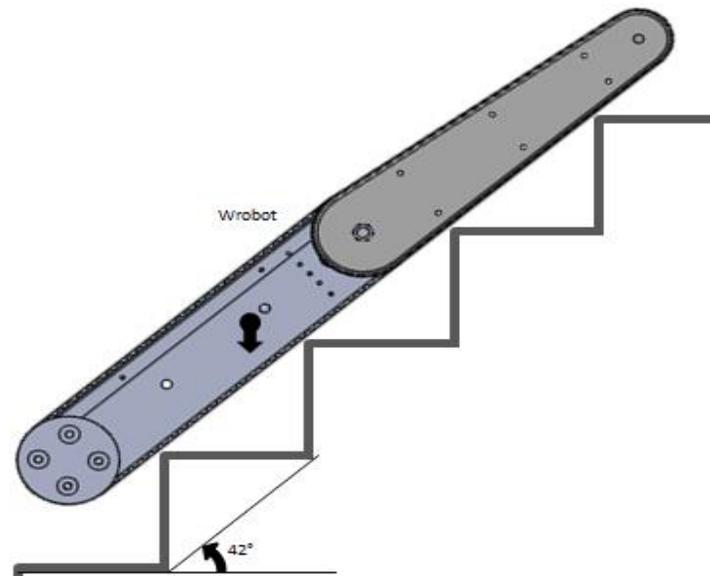


Figura 15. Posicionamiento del robot sobre las gradas

3.2.3.1. Dimensionamiento de los motores

Se analiza el sistema en las condiciones de mayor esfuerzo, es decir a una inclinación de 42° con respecto a la horizontal, en este caso la fuerza en contra del movimiento es la componente del peso total del robot sobre el eje a 42° y la fuerza a favor del movimiento hacia adelante del robot es la entregada por el torque del motor a una distancia de 10 cm correspondiente al diámetro de la rueda más el espesor de la banda, con estas condiciones obtenemos:

Ecuación 3 Torque de las ruedas del robot

$$T_{ruedas} = (W_{robot})(\text{Cos}(42^\circ) * (\text{radio de rueda}))$$

$$T_{ruedas} = (15Kg)(\text{Cos}(42^\circ)(5cm))$$

$$T_{ruedas} = 55.74 \text{ Kg cm}$$

Ecuación 4 Torque del motor para la estructura del robot

$$T_{motor\ de\ estructura} = \frac{Truedas}{2}$$

$$T_{motor\ de\ estructura} = 27.87\ Kg\ cm$$

3.2.4. Selección de motores

Tomando en cuenta el peso máximo establecido para el robot y la presencia de otros factores que puedan presentarse, el torque necesario para los motores se multiplica por un factor de seguridad de 1.6, que equivale a un 60% de torque adicional al torque teórico calculado.

Ecuación 5 Factor de seguridad en motor del brazo

$$T_{motor\ de\ brazos} = 60.67\ Kg\ cm * 1,6$$

$$T_{motor\ de\ brazos} = 97,072\ Kg\ cm$$

Ecuación 6 Factor de seguridad en motor de la estructura

$$T_{motor\ de\ estructura} = 27.87\ Kg\ cm * 1,6$$

$$T_{motor\ de\ estructura} = 44,592\ Kg\ cm$$

A continuación se indica las opciones de motores existentes en el mercado que cumplen con las características necesarias para el desarrollo del proyecto (ver Tabla 10).

Tabla 10
Opciones de motores

N°	MOTOR	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
A	TSINY 93-GZ-868	Torque	120 Kg.cm
		Velocidad	5 Rpm
		Peso	1,2 Kg
		Precio	\$48
B	TSINY TS-40 GZ868-505	Torque	98 Kg.cm
		Velocidad	9 Rpm
		Peso	1,06 Kg
		Precio	\$77
C	UXCELL -JCF63L	Torque	100 Kg.cm
		Velocidad	60 Rpm
		Peso	1,35 Kg
		Precio	\$77

Se determina el porcentaje de ponderación en función de la importancia de cada parámetro del motor (ver Tabla 11) de igual manera que se realizó la selección del material para la estructura.

Tabla 11
Ponderación de parámetros para la selección de motores

Parámetro	Precio	Torque	Velocidad	Peso	$\Sigma +1$	%
Precio	-	0	0	2,5	3,5	9,59
Torque	5	-	5	5	16	43,84
Velocidad	2,5	2,5	-	5	11	30,14
Peso	5	0	0	-	6	16,44
Total					36,5	100

Elaboramos la matriz para comparar las alternativas de solución con un parámetro específico del motor (ver Tabla 12).

Tabla 12
Resultados para la selección del motor

Parámetro	% de importancia	BEMONOC 93-GZ-868		TSINY TS-40 GZ868-505		UXCELL -JCF63L	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Precio	9,59	1	0,096	5	0,48	3	0,29
Torque	43,84	3	1,32	5	2,19	3	1,32
Velocidad	30,14	1	0,30	1	0,30	1	0,30
Peso	16,44	3	0,49	3	0,49	1	0,16
		Total	2,206	Total	3,46	Total	2,07

Luego de realizado el análisis de las opciones de motores dc del mercado, se optará por el motor TSINY TS-40 GZ868-505 para las extremidades, el cual cumple con todos los requerimientos técnicos y teóricos para el presente proyecto. Como motores para la estructura se opta por el mismo motor que se usará para las extremidades, de manera que no altere el diseño de la estructura.

3.2.4.1. Características de los motores adquiridos

La selección de los motores se realizó tomando en cuenta los requerimientos de torque, la facilidad de compra y el precio. Los motores seleccionados de características cercanas a las requeridas fueron el modelo TSINY Worm Gear Motor TS-40 GZ868-505 (ver Figura 16) cuyas características se detallan a continuación en la Tabla 13.



Figura 16. Motor TSINY TS-40 GZ868-505
Fuente: (TSINY Micro motion solutions, 2009)

Tabla 13

Características del motor TSINY TS-40 GZ868-505

MOTOR TSINY TS-40 GZ868-505

Voltaje de alimentación	12 V
Velocidad sin carga	9 RPM
Corriente sin carga	0,46 A
Velocidad nominal	6,8 RPM
Corriente nominal	1,2 A
Torque pico	98 Kg.cm

Fuente: (TSINY Micro motion solutions, 2009)

3.2.5. Selección de las baterías

El robot al ser un prototipo no requiere un uso extendido y continuo. Se propuso que al menos tenga una duración continua de dos horas. Tomando en cuenta las características de los motores seleccionados (ver Tabla 13) se calculó la capacidad de baterías requeridas:

Ecuación 7 Capacidad requerida de batería

$$\text{Capacidad requerida} = (\text{Intensidad}) * (\text{tiempo de uso})$$

$$\text{Capacidad requerida} = (1,2 A) * (2 h)$$

$$\text{Capacidad requerida} = 2400 \text{ mAh}$$

No es necesario hacer un análisis para la selección de las baterías del robot, ya que el proyecto ocupa baterías que el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército CICTE tiene como activo fijo en bodega.

Una de las baterías estará conectada a dos motores por lo cual el tiempo de trabajo podría reducirse a la mitad. El modelo de las baterías empleadas en el proyecto (ver Figura 17) y las características técnicas (ver Tabla 14) se detallan a continuación:



Figura 17. Batería Turnigy XT-90
(Turnigy power systems)

Tabla 14

Características de las baterías Turnigy XT-90

BATERÍAS TURNIGY XT-90

Capacidad mínima:	5000mAh
Configuración:	4S1P / 14.8v / 4Celdas
Descarga constante:	25C
Descarga máxima (10seg):	35C
Peso del paquete:	552g
Tamaño del paquete:	147 x 49 x 33mm
Enchufe de carga:	JST-XH
Enchufe de descarga:	XT-90

Para la alimentación de la tarjeta de control se utilizó un cargador portátil Sony CP-V10A/WC (ver Figura 18) el cual ofrece un voltaje adecuado y un puerto de carga compatible con el de la Raspberry Pi 3 modelo B. El modelo fue seleccionado por la disponibilidad en el mercado y la adaptabilidad de las características técnicas para la elaboración del proyecto (ver Tabla 15).



Figura 18. Cargador portátil Sony CP-V10A/WC
Fuente: (Sony, 2018)

Tabla 15

Características del cargador portátil Sony CP-V10A/WC

CARGADOR PORTÁTIL SONY CP-V10A/WC

Led indicador	Si
Conectividad	USB 2.0, Puerto de salida: 1
Entrada de poder	5 V, 1,5 A
Salida de poder	5 V, 1,5 A
Capacidad	10000 mAh
Ciclos de recarga	1000
Tipo de conector de salida	Micro USB

Fuente: (Sony, 2018)

3.2.6. Diseño de Componentes mecánicos

3.2.6.1. Cálculo del engranaje

Se establece un diámetro primitivo de 40 mm para cada engranaje a fin de obtener una distancia adecuada que facilite el montaje del motor y del eje.

El modulo seleccionado $m = 2$ no genera interferencia y fue seleccionado por la disponibilidad en el laboratorio de procesos. Con estos datos se calcula el número de dientes:

Ecuación 8 Número de dientes del engranaje

$$z = \frac{d_p}{m} = 20 \text{ dientes}$$

El ancho de cara se calcula como se muestra a continuación:

Ecuación 9 Ancho de la cara del engranaje

$$b = (10 \text{ a } 15) * \text{módulo}$$

$$b = (10) * (2) = 20 \text{ mm}$$

Para calcular los esfuerzos generados en los dientes del engranaje se utilizan las ecuaciones del esfuerzo AGMA de flexión y de contacto descritas a continuación.

Ecuación 10 Esfuerzo a flexión

$$\sigma_f = W_t k_o k_v k_s \frac{k_H k_B}{b m t Y_j}$$

Dónde:

- W_t es la carga tangencial transmitida, en lbf (N)

- k_o es el factor de sobrecarga
- k_v es el factor dinámico
- k_s es el factor de tamaño
- b es el ancho de la cara del elemento más angosto, en pulgadas
- k_H es el factor de distribución de la carga
- k_B es el factor del espesor del aro
- Y_j es el factor geométrico de resistencia a la flexión
- mt es el módulo métrico transversal

Ecuación 11 Esfuerzo por contacto

$$\sigma_M = Z_e \sqrt{W_t k_o k_v k_s \frac{k_H Z_R}{d_{w1} b Z_I}}$$

Dónde:

- Z_e es un coeficiente elástico
- Z_R es el factor de condición superficial
- d_{w1} es el diámetro de paso del piñón en (mm)
- Z_I es el factor geométrico de resistencia a la picadura

El factor de sobrecarga k_o se obtiene mediante la Tabla 16, en este caso se asumió que la fuente de potencia genera un impacto ligero y la maquina impulsada un impacto moderado por lo cual se tiene el factor $k_o = 1,5$

Tabla 16
Factores de sobrecarga K_o

FACTORES DE SOBRECARGA K_o			
Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

En el caso del factor dinámico k_v se obtiene su valor de los datos de la Figura 19, para lo cual se calcula la velocidad en el d_p de la siguiente manera:

Ecuación 12 Velocidad lineal

$$v = (\omega) * (r)$$

$$v = (0,942) \frac{rad}{s} * (20)mm$$

$$v = 18,84 \frac{mm}{s}$$

$$v = 0,018 \frac{m}{s}$$

Ecuación 13 Factor dinámico

$$k_v = 1$$

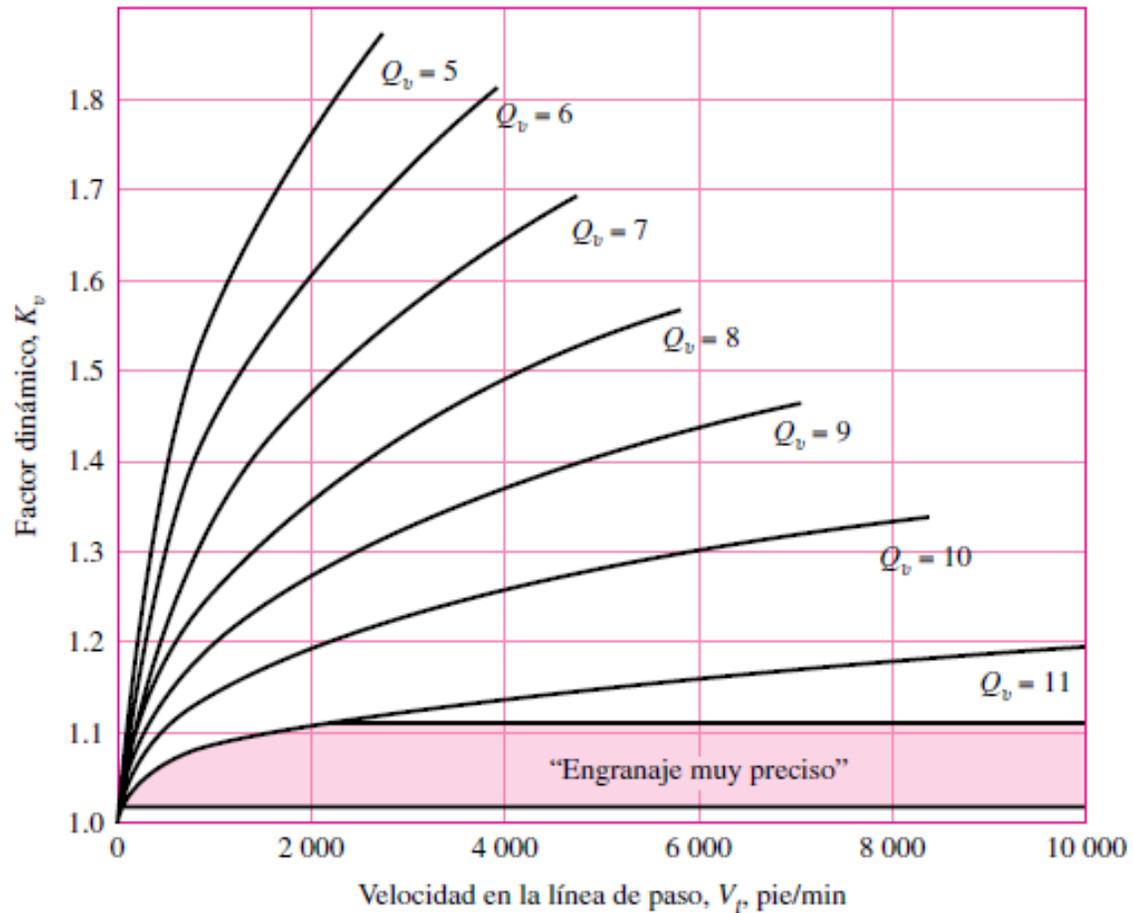


Figura 19. Factor dinámico K_v
Fuentes: (Budynas & Nisbett, 2008)

Para el cálculo del factor de tamaño k_s se calcula el diámetro equivalente, de la siguiente forma:

Ecuación 14 Diámetro equivalente

$$d_e = (0,808) * (\sqrt{f_t})$$

$$d_e (= 0,808) * (480,53)$$

$$d_e = 388,26$$

Ecuación 15 Factor del espesor del aro

$$k_B = \left(\frac{d_e}{0,3} \right) - (0,107)$$

$$k_B = 0,46$$

Ecuación 16 Factor de tamaño

$$k_s = \frac{1}{k_b}$$

$$k_s = 2,15$$

El factor de distribución de carga k_H se viene dado por la fórmula:

Ecuación 17 Factor de distribución de la carga

$$k_H = C_{mf} = 1 + C_{mc} (C_{pf} C_{pm} + C_{ma} C_e)$$

- $C_{mc} = 1$ ya que los dientes del engranaje son sin corona
- $C_{pf} = \frac{b}{10d} - 0,025$; (ya que $F \leq 1$ in)

$$C_{pf} = 0,075$$

- $C_{pm} = 1$ Para piñón montado separado con $S1/S < 0.175$

Tabla 17

Constantes empíricas A, B, C

CONDICIÓN	A	B	C
Engranajes abiertos	0,247	0,0167	-0,765
Unidades comerciales, cerradas	0,127	0,0158	-0,93
Unidades de precisión, cerradas	0,0675	0,0128	-0,926
Unidades de precisión extrema, cerradas	0,0036	0,0102	-0,822

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

- $C_{ma} = A + BF + CF^2$

$$C_{ma} = 0,247 + 0,0167 (26) + 0,765 (10^{-4})(20^2)$$

$$C_{ma} = 0,55$$

- $C_e = 1$ en condiciones normales de mejoras

Con las variables obtenidas y reemplazadas en la Ecuación 17 obtenemos el factor de distribución de carga $k_H = 1,625$.

El cálculo del factor de espesor de aro k_B se basa en los datos obtenidos en la Figura 20 y en las relaciones siguientes:

Ecuación 18 Altura del diente

$$h_t = 2,1677 * m_B$$

$$h_t = 4,3354 \text{ mm}$$

Ecuación 19 Altura de la base del diente

$$t_R = 9$$

Ecuación 20 Relación de apoyo

$$m_B = \frac{t_R}{h_t}$$

$$m_B = 2$$

Ecuación 21 Factor de espesor del aro

$$k_B = 1$$

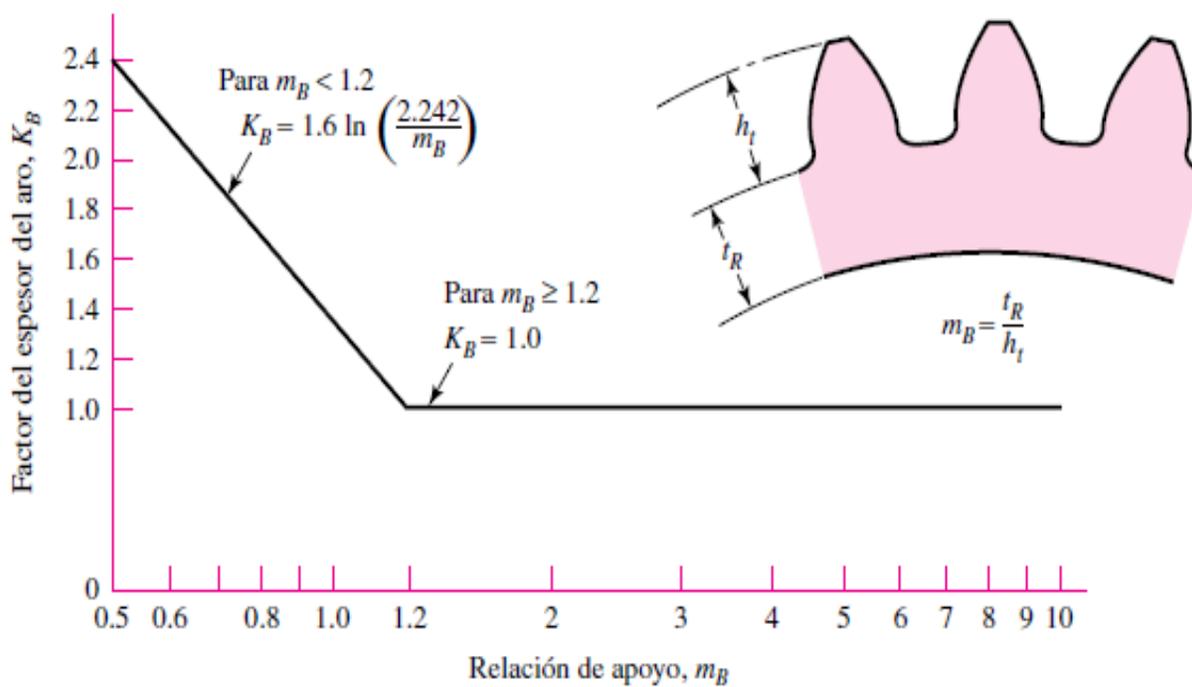


Figura 20. Factor del espesor del aro KB
 Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Para el cálculo del factor geométrico Y_j utilizamos los datos obtenidos en la Figura 21 donde el valor de $Y_j = 0,32$ para engranajes de 20 dientes.

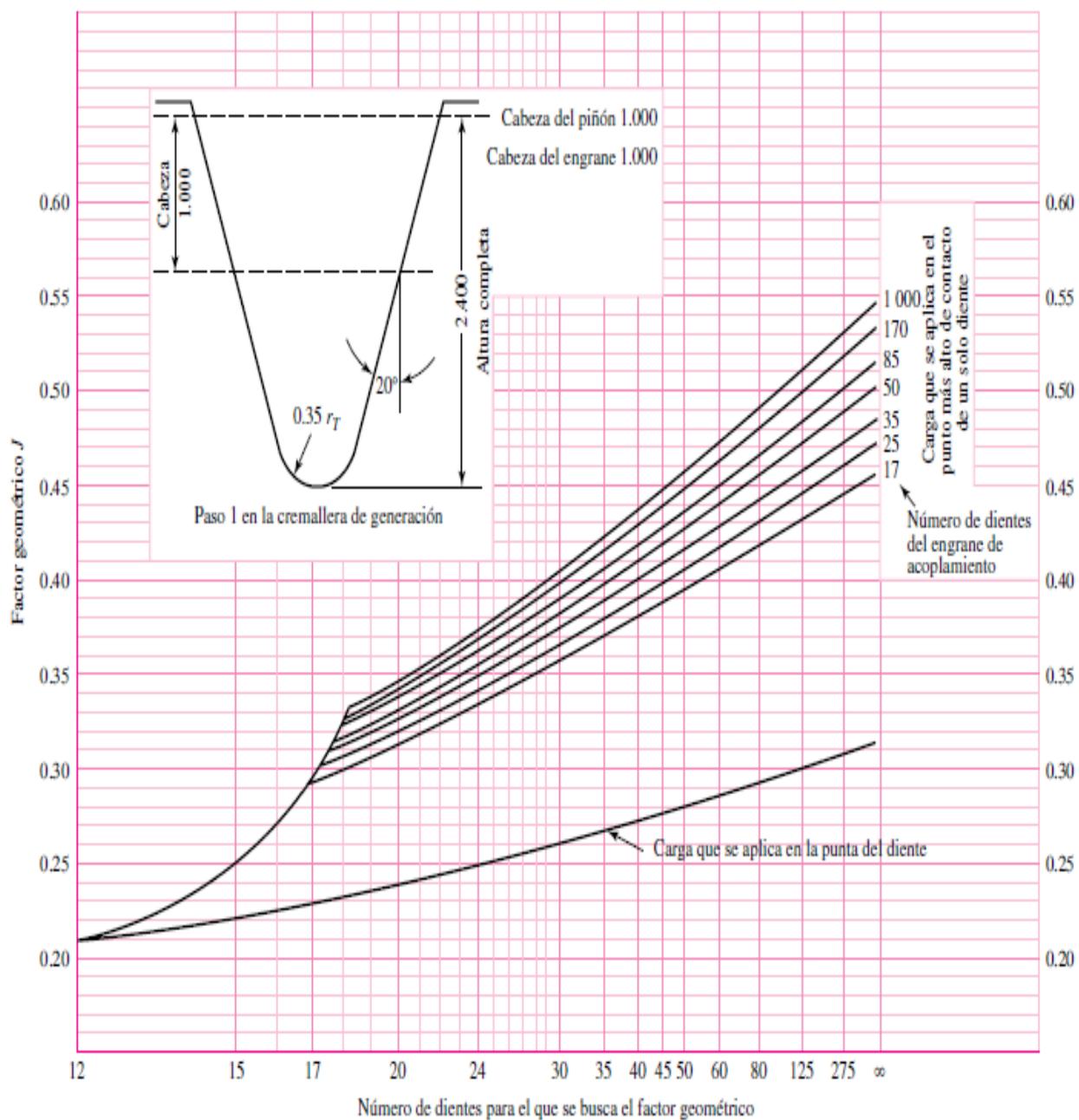


Figura 21. Factores geométricos J de engranajes rectos

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

En el caso del coeficiente elástico Z_e su valor se obtiene de la tabla (ver Tabla 18) donde el valor tabulado es $Z_e = 17,5 * 10^6 \sqrt{MPa}$.

Tabla 18
Coefficiente elástico

MATERIAL Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA CORONA E_G, $lbF/pulg^2$ (MPA)*							
Material del Piñón	Módulo de elasticidad del piñón Ep psi (MPa)	Acero $30X10^6$ ($2X10^5$)	Hierro maleable $25X10^6$ ($1.7X10^5$)	Hierro nodular $24X10^6$ ($1.7X10^5$)	Hierro fundido $22X10^6$ ($1.5X10^5$)	Bronce de Aluminio $17.5X10^6$ ($1.2X10^5$)	Bronce al estaño $16X10^6$ ($1.1X10^5$)
Acero	$30X10^6$ ($2X10^5$)	2300 (191)	2180 (181)	2160 (179)	2100 (174)	1950 (162)	1900 (158)
Hierro maleable	$25X10^6$ ($1.7X10^5$)	2180 (181)	2090 (174)	2070 (172)	2020 (168)	1900 (158)	1850 (154)
Hierro nodular	$24X10^6$ ($1.7X10^5$)	2160 (179)	2070 (172)	2050 (170)	2000 (166)	1880 (156)	1830 (152)
Hierro fundido	$22X10^6$ ($1.5X10^5$)	2100 (174)	2020 (168)	2000 (166)	1960 (163)	1850 (154)	1800 (149)
Bronce al aluminio	$17.5X10^6$ ($1.2X10^5$)	1950 (162)	1900 (158)	1880 (156)	1850 (154)	1750 (145)	1700 (141)
Bronce al estaño	$16X10^6$ ($1.1X10^5$)	1900 (158)	1850 (154)	1830 (152)	1800 (149)	1700 (141)	1650 (137)

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

El factor geométrico de resistencia a la picadura se lo obtiene en la figura (ver Figura 22), en la cual el valor $Z_t = 0,93$.

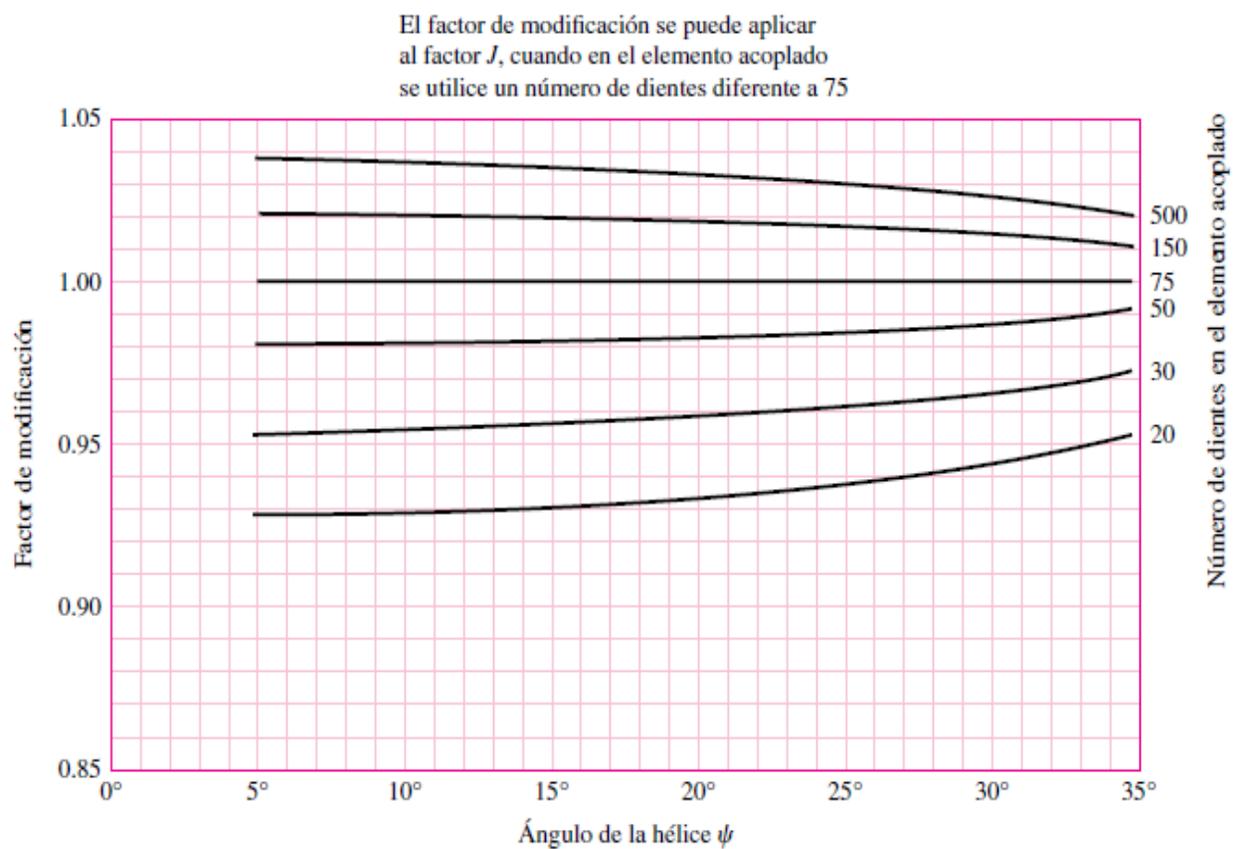


Figura 22. Factor de modificación
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Por último se asume el valor para el factor de condición superficial $Z_R = 1$ dado que no se espera condiciones superficiales anormales.

Una vez obtenidos todos los factores se reemplazan en las ecuaciones de esfuerzos AGMA de donde obtenemos:

Ecuación 22 Esfuerzo a flexión

$$\sigma_f = 480,53 \text{ N} (1,5)(1)(2,15) \frac{(1,625)(1)}{20 \text{ mm} (2)(0,32)}$$

$$\sigma_f = 199,76 \text{ MPa}$$

Ecuación 23 Esfuerzo por contacto

$$\sigma_M = 145\sqrt{\text{MPa}} \sqrt{(480,53 \text{ N})(1,5)(1)(2,15) \frac{(1,625)(1)}{(40\text{mm})(20\text{mm})(0,93)}}$$

$$\sigma_M = 266 \text{ MPa}$$

Para la construcción del engranaje tomando en cuenta los esfuerzos calculados, además de la disponibilidad del material, el peso y la maquinabilidad del mismo se selecciona el duraluminio que cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

$$S_{ut} = 540 \text{ MPa}$$

$$S_y = 480 \text{ MPa}$$

3.2.6.2. Cálculo del eje

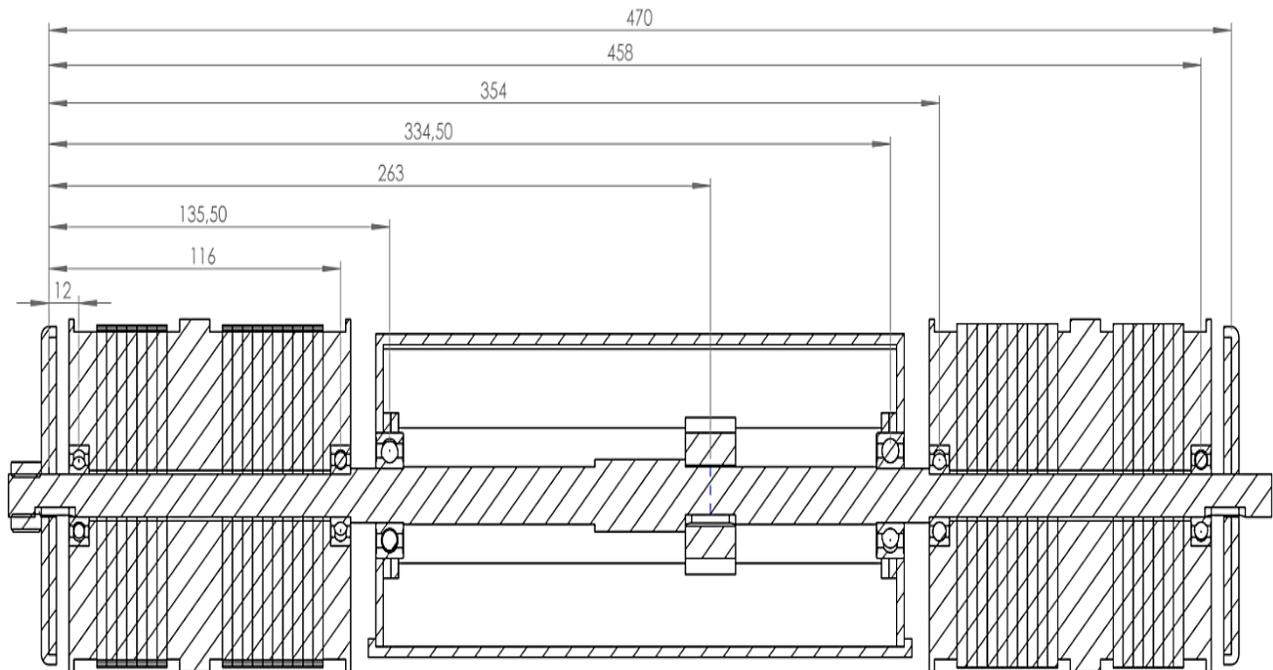


Figura 23. Eje de las extremidades del robot

Se utiliza engranajes rectos para transmitir el movimiento del motor al eje encargado de levantar los brazos del robot. Debido al tipo de engrane utilizado se genera una componente normal y una tangencial en el punto de contacto entre engranajes.

El torque del motor utilizado es de 98 [Kg cm] que equivale a 961,01 [N cm] y el diámetro de paso de los engranajes es de 4 cm por lo que se tiene:

Ecuación 24 Componente tangencial de la fuerza generada

$$W_t = F_{12}^t = \frac{961,05 \text{ N} \cdot \text{cm}}{2 \text{ cm}} = 480,53 \text{ N}$$

Ecuación 25 Componente radial de la fuerza generada

$$F_{12}^r = F_{12}^t \tan(20)$$

$$F_{12}^r = 174,9 \text{ N}$$

Para calcular los diámetros de cada tramo del eje se realiza un análisis de esfuerzo cortante y momento flector, para lo cual se inició con el cálculo de las reacciones generadas en los rodamientos del chasis debido al funcionamiento del motor (ver Figura 24).

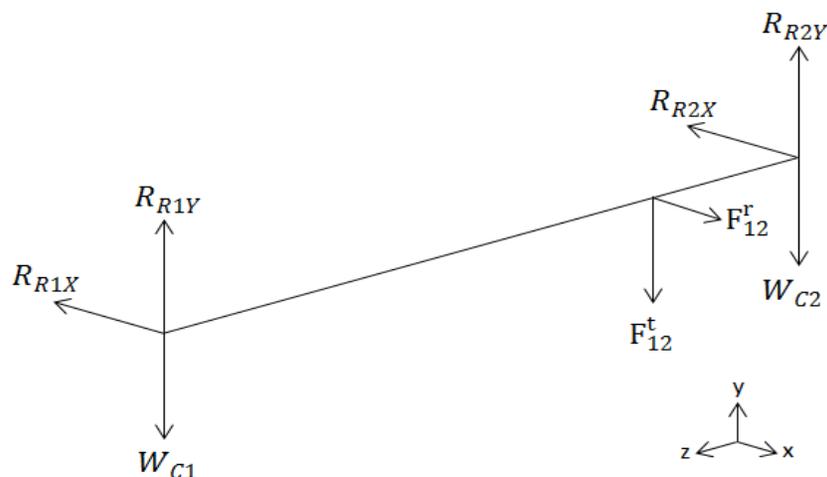


Figura 24. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector en el eje del robot

La posición de mayor esfuerzo para el eje se daría cuando los brazos soporten todo el peso del chasis del robot en los puntos R_{R1} y R_{R2} , el peso soportado sería entonces:

Ecuación 26 Reacciones en los rodamientos del chasis

$$W_{C1} = W_{C2} = \frac{W_C}{2} = \frac{9,4 \text{ Kg}}{2} = 4,7 \text{ Kg}$$

$$W_{C1} = W_{C2} = 46,1 \text{ N}$$

Se realiza la sumatoria de fuerzas y momentos en los ejes “x” y “y” para calcular el valor de las reacciones en los puntos R_{R1} y R_{R2} , para la sumatoria de momentos se tomó como positivos los valores que generan una rotación en sentido horario, se tiene entonces:

Ecuación 27 Sumatoria de fuerzas en el eje “Y” en el plano Y-Z

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_{R1Y} - 92,2 \text{ N} - 480,63 \text{ N} + R_{R2Y} = 0$$

$$R_{R1Y} + R_{R2Y} = 572,73 \text{ N}$$

$$R_{R1Y} = 218,75 \text{ N}$$

Ecuación 28 Sumatoria de momentos en el eje “Y” en el plano Y-Z

$$\sum M_Y = 0$$

$$46,1 \text{ N} (199 \text{ mm}) + 480,53 \text{ N} (127,5 \text{ mm}) - R_{R2Y} (199 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{R2Y} = 353,98 \text{ N}$$

Ecuación 29 Sumatoria de fuerzas en el eje “X” en el plano X-Z

$$\sum F_X = 0$$

$$R_{R1X} + R_{R2Y} - 174,9 \text{ N} = 0$$

$$R_{R1X} = 62,84 \text{ N}$$

Ecuación 30 Sumatoria de momentos en el eje “X” en el plano X-Z

$$\sum M_x = 0$$

$$174,9 \text{ N} (127,5 \text{ mm}) - R_{R2Y} (199 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{R2X} = 112,06 \text{ N}$$

Ahora se realiza el cálculo de las reacciones en los puntos R_A y R_B del eje, el diagrama resultante se muestra a continuación (ver Figura 25).

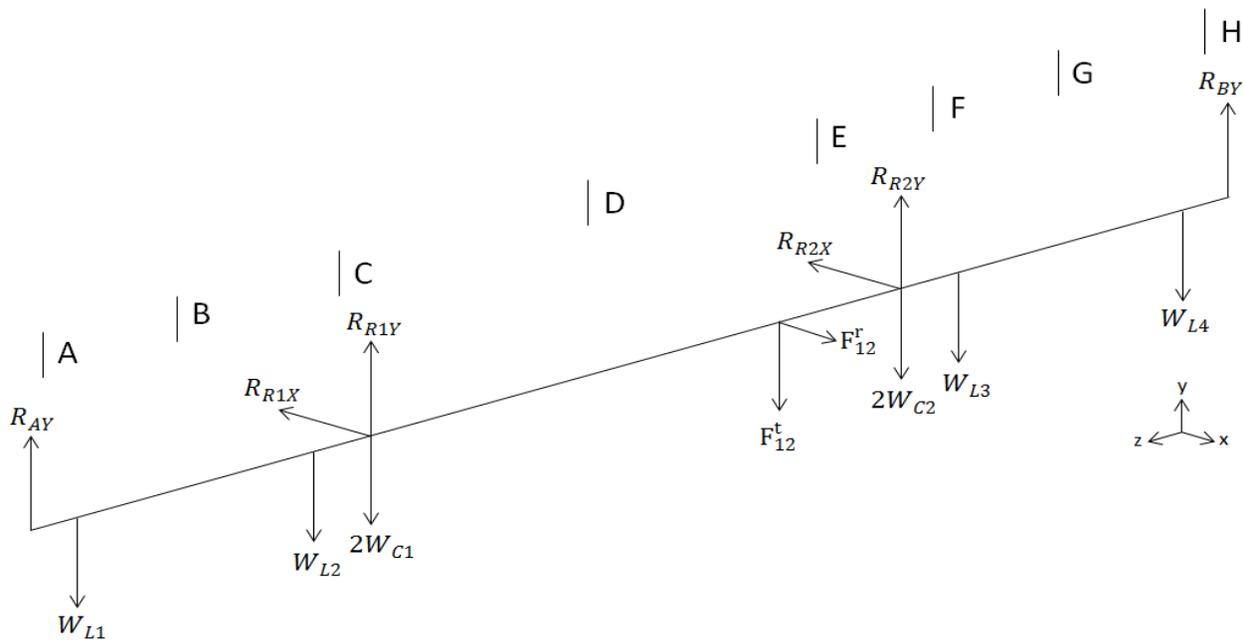


Figura 25. Diagrama de reacciones en el eje del robot

En este caso para simplificar el cálculo obviamos las fuerzas que actúan internamente pues la suma de todas ellas es cero, realizando la sumatoria de fuerzas y momentos en los ejes “x” y “y” se tiene:

Ecuación 31 Sumatoria de fuerzas en el eje “Y” en el plano Y-Z

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_{AY} - W_{L1} - W_{L2} - W_{C1} - W_{C2} - W_{L3} - W_{L4} + R_{BY} = 0$$

$$R_{AY} + R_{BY} = 4(7,36 \text{ N}) + 92,2 \text{ N}$$

$$R_{AY} + R_{BY} = 121,64 \text{ N}$$

Ecuación 32 Sumatoria de momentos en el eje “Y” en el plano Y-Z

$$\sum M_Y = 0$$

$$W_{L1}(12 \text{ mm}) + W_{L2}(116 \text{ mm}) + W_{C1}(135,5 \text{ mm}) + W_{C2}(334,5 \text{ mm}) - W_{L3}(354 \text{ mm})$$

$$+ W_{L4}(458 \text{ mm}) - R_{BY}(470 \text{ mm}) = 0$$

$$(88,32 + 853 + 6246,55 + 15420,45 + 2605,44 + 3370,88)N = R_{BY} (470 \text{ mm})$$

$$R_{BY} = 60,82 \text{ N}$$

$$R_{AY} = 62,82 \text{ N}$$

Con los datos obtenidos se realiza los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector.

Plano Y-Z, sentido z (-)

Ecuación 33 Esfuerzo cortante en la sección A

$$V = R_{AY} = 60,82 \text{ N}$$

Ecuación 34 Momento flector en la sección A

$$M = V(x)$$

$$M_{(0)} = 0$$

$$M_{(12)} = 729,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 35 Esfuerzo cortante en la sección B

$$V = R_{AY} - W_{L1}$$

$$V = 60,82 - 7,36 \text{ N} = 53,46 \text{ N}$$

Ecuación 36 Momento flector en la sección B

$$M = W_{L1} (12 \text{ mm}) + V (x)$$

$$M_{(12)} = 729,84 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{(116)} = 6289,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 37 Esfuerzo cortante en la sección C

$$V = R_{AY} - W_{L1} - W_{L2}$$

$$V = 60,82 \text{ N} - 2(7,36)\text{N}$$

$$V = 46,1 \text{ N}$$

Ecuación 38 Momento flector en la sección C

$$M = W_{L1} (12 \text{ mm}) + W_{L2} (116 \text{ mm}) + V (x)$$

$$M_{(116)} = 6289,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{(135,5)} = 7188,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 39 Momento flector en la sección D

$$V = R_{AY} - W_{L1} - W_{L2} - 2W_{C1} + R_{R1Y}$$

$$V = 60,82 \text{ N} - 2 (7,36)\text{N} - 92,2 \text{ N} + 218,75 \text{ N}$$

$$V = 172,65 \text{ N}$$

Ecuación 40 Momento flector en la sección D

$$M = W_{L1} (12 \text{ mm}) + W_{L2} (116 \text{ mm}) + (135,5 \text{ mm})(2W_{C1} - R_{R1Y}) + V(x)$$

$$M_{(135,5)} = 7188,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{(263)} = 29201,85 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Plano Y-Z, sentido z (+)

Ecuación 41 Esfuerzo cortante en la sección H

$$V = R_{BY}$$

$$V = 60,82 \text{ N}$$

Ecuación 42 Momento flector en la sección H

$$M = V(x)$$

$$M_{(0)} = 0 \text{ N. mm}$$

$$M_{(12)} = 729,84 \text{ N. mm}$$

Ecuación 43 Esfuerzo cortante en la sección G

$$V = R_{BY} - W_{L4}$$

$$V = 60,82 \text{ N} - 7,36 \text{ N}$$

$$V = 53,46 \text{ N}$$

Ecuación 44 Momento flector en la sección G

$$M = W_{L4} (12 \text{ mm}) + V(x)$$

$$M_{(12)} = 729,84 \text{ N. mm}$$

$$M_{(116)} = 6289,68 \text{ N. mm}$$

Ecuación 45 Esfuerzo cortante en la sección F

$$V = R_{BY} - W_{L4} - W_{L3}$$

$$V = 60,82 \text{ N} - 2(7,36) \text{ N}$$

$$V = 46,1 \text{ N}$$

Ecuación 46 Momento flector sección F

$$M = W_{L4} (12 \text{ mm}) + W_{L3} (116 \text{ mm}) + V(x)$$

$$M_{(116)} = 6289,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{(135,5)} = 7188,63 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 47 Esfuerzo cortante sección E

$$V = R_{BY} - W_{L4} - W_{L3} - 2W_{C2} + R_{R2Y}$$

$$V = 60,82 \text{ N} - 2(7,36)\text{N} - 92,2 \text{ N} + 353,98 \text{ N}$$

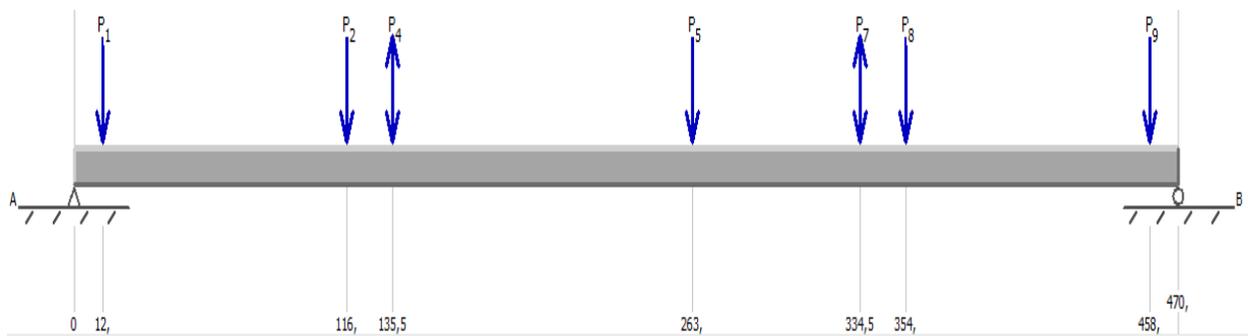
$$V = 307,88 \text{ N}$$

$$V = W_{L4} (12 \text{ mm}) + W_{L3} (116 \text{ mm}) + (135,5 \text{ mm})(2W_{C1} - R_{R2Y}) + V(x)$$

$$V_{(135,5)} = 1188,63 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$V_{(207)} = 29201,51 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Con los resultados obtenidos se tienen los siguientes gráficos de esfuerzo cortante y momento flector para el plano Y-Z (ver Figura 26).



CONTINÚA



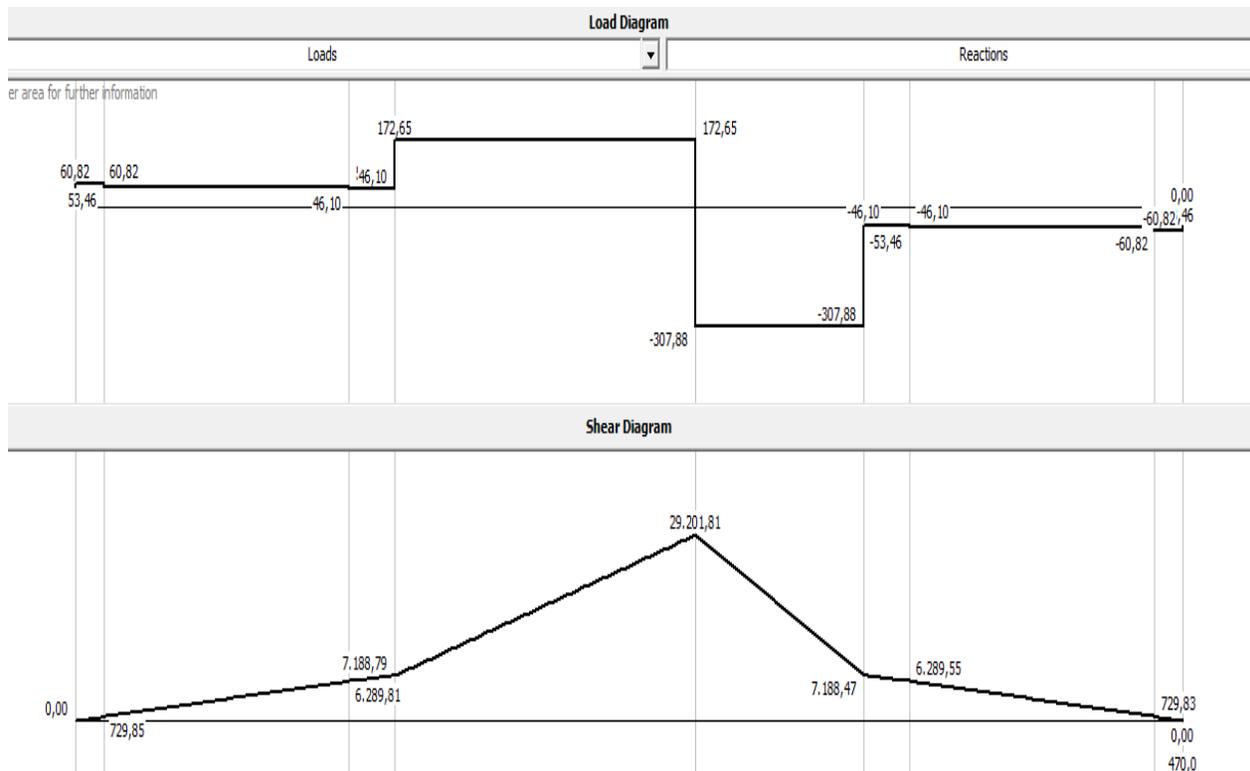


Figura 26. Esfuerzo cortante y momento flector en el eje del robot en el plano Y - Z

Ahora se realiza el cálculo de esfuerzos y momentos en el plano X - Z:

Plano X-Z, sentido z (-)

Ecuación 48 Esfuerzo cortante en la sección D

$$\sum F_x = 0$$

$$V = R_{R1X}$$

$$V = 112,84 \text{ N}$$

Ecuación 49 Momento flector en la sección D

$$\sum M_x = 0$$

$$M = V(x)$$

$$M_{(0)} = 0 \text{ N. mm}$$

$$M_{(127,5)} = 8012,22 \text{ N. mm}$$

Plano X-Z, sentido z (+)

Ecuación 50 Esfuerzo cortante en la sección E

$$\sum F_X = 0$$

$$V = R_{R2X}$$

$$V = 112,05 \text{ N}$$

Ecuación 51 Momento flector en la sección E

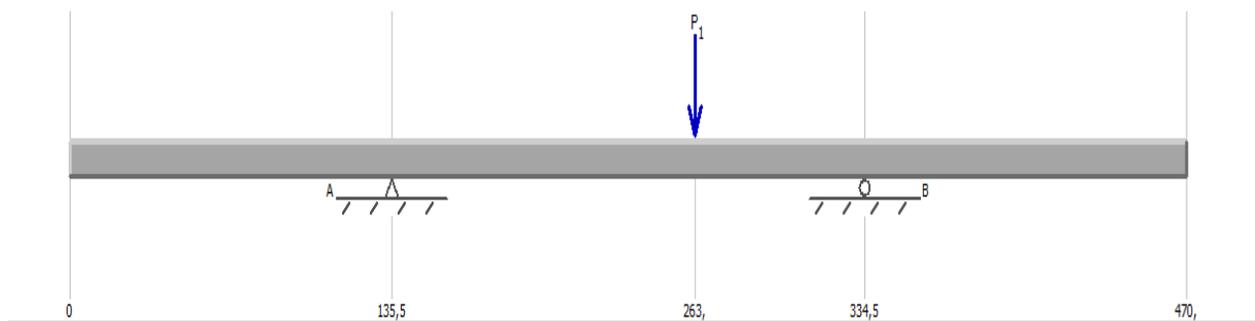
$$\sum M_X = 0$$

$$M = V(x)$$

$$M_{(0)} = 0$$

$$M_{(127,5)} = 8012,22 \text{ N mm}$$

Con los resultados obtenidos se realiza el grafico de esfuerzo cortante y momento flector correspondiente en el plano X - Z (ver Figura 27).



CONTINÚA



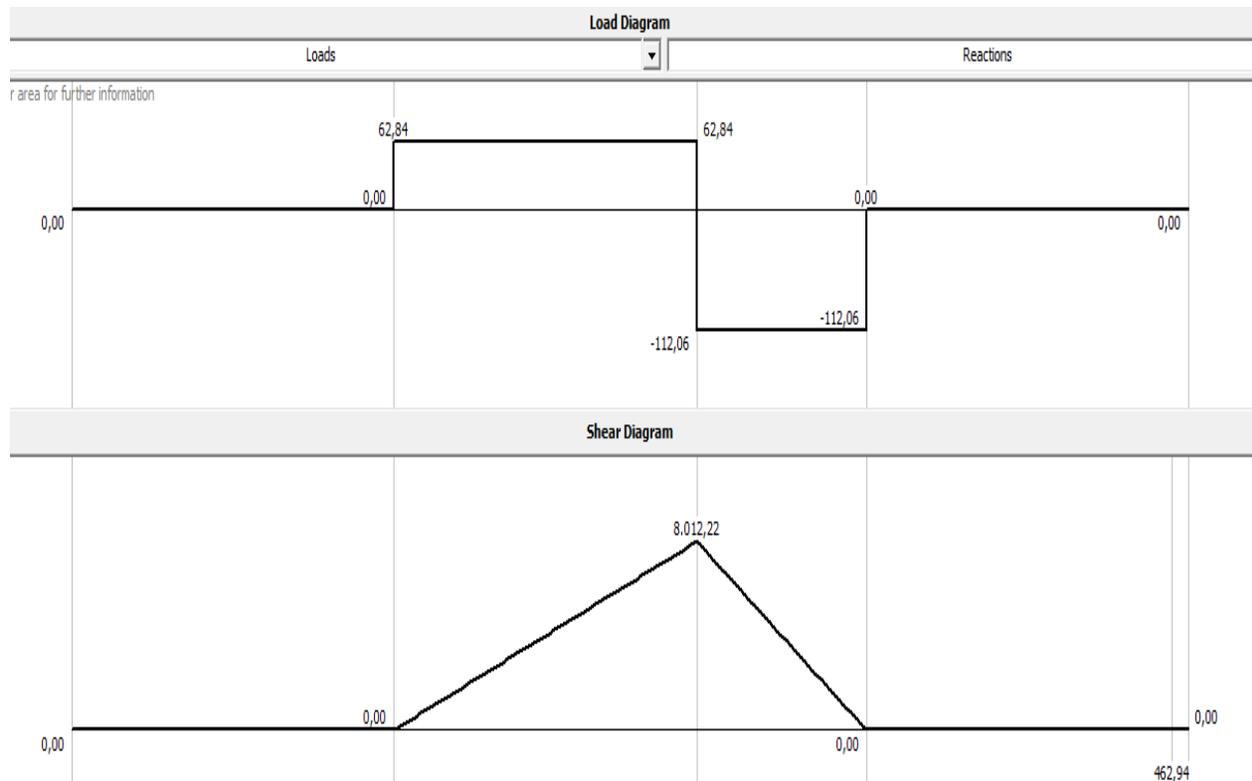


Figura 27. Esfuerzo cortante y momento flector en el eje del robot en el plano X - Z
El momento resultante en el punto del engranaje se obtiene de la siguiente forma:

Ecuación 52 Momento resultante

$$Mr_{(263)} = \sqrt{(8012,22^2 + 29201,85^2)} \text{ N. mm}$$

$$Mr_{(263)} = 30281,08 \text{ N. mm}$$

El material seleccionado para el eje es acero A36, el cual tiene un esfuerzo a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa}$ y un esfuerzo mínimo de ruptura en tensión $S_{ut} = 550 \text{ MPa}$.

El punto de mayor esfuerzo es el punto de ubicación del engranaje, como valor inicial para una primera iteración utilizamos un diámetro de 18mm en ese punto.

Se realiza el cálculo del límite de resistencia de la parte crítica de un componente de máquina en su geometría y condiciones de uso S_e , para lo cual se hace uso de la siguiente fórmula.

Ecuación 53 Factores del límite de resistencia

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e$$

Dónde:

- K_a = factor de modificación de la condición superficial
- K_b = factor de modificación del tamaño
- K_c = factor de modificación de la carga
- K_d = factor de modificación de la temperatura
- K_e = factor de confiabilidad
- K_f = factor de modificación de efectos varios
- S'_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Se calcula el límite de resistencia de viga rotativa S'_e de la siguiente forma:

Ecuación 54 Límite de resistencia a la fatiga en viga rotativa

$$S'_e = 0,5 S_{ut}$$

$$S'_e = 275 \text{ MPa}$$

El factor de superficie K_a se obtiene utilizando los valores de la Tabla 19 y reemplazando los valores en la fórmula correspondiente de lo cual obtenemos:

Tabla 19*Parámetros en el factor de la condición superficial de Marín*

ACABADO SUPERFICIAL	Factor a		Exponente b
	S_{urt} Kpsi	S_{urt} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0,085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0,265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0,718
Como sale de la forja	39.9	272	-0,995

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Ecuación 55 Factor de modificación de la condición superficial

$$K_a = aS_{ut}^b$$

$$K_a = 4,51 (550)^{-0,265}$$

$$K_a = 0,847$$

El factor de tamaño K_b dado que el diámetro d cumple la condición $2,79 \text{ mm} \leq d \leq 51$ mm, se calcula con la siguiente formula:

Ecuación 56 Factor de modificación del tamaño

$$K_b = 1,24d^{-1,07}$$

$$K_b = 0,91$$

Debido a que la caja genera flexión el factor de carga es:

Ecuación 57 Factor de modificación de la carga

$$K_c = 1$$

El factor de temperatura debido a que el robot trabajará a temperatura ambiente es:

Ecuación 58 Factor de modificación de la temperatura

$$K_d = 1 ,$$

Para el factor de confiabilidad K_e utilizamos la Tabla 20, en la cual seleccionamos el valor correspondiente a una confiabilidad de 99% que es la seleccionada, obteniendo el valor

Ecuación 59 Factor de confiabilidad

$$K_e = 0,814.$$

No se consideran efectos varios por lo cual $K_e = 1$

Tabla 20

Factor de confiabilidad K_e

CONFIABILIDAD %	VARIACIÓN DE TRANSFORMACIÓN, ZA	FACTOR DE CONFIABILIDAD KE
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Una vez obtenidos todos los valores reemplazamos en la Ecuación 53 obteniendo:

$$S_e = (0,814)(0,91)(1)(1)(0,814)(275)$$

$$S_e = 172,53 \text{ MPa}$$

Ahora analiza la concentración de esfuerzo basándose en la gráfica de factor teórico de concentración del esfuerzo en un eje redondo con filete en el hombro en torsión (ver Figura 28) y con filete en el hombro en flexión (ver Figura 29), tomando en cuenta que $D = 20$, $d = 18$ y $r = 0,25$, de esta forma obtenemos el valor de los factores K_{ts} y K_t .

$$\frac{r}{d} = 0,013; \quad \frac{D}{d} = 1,1$$

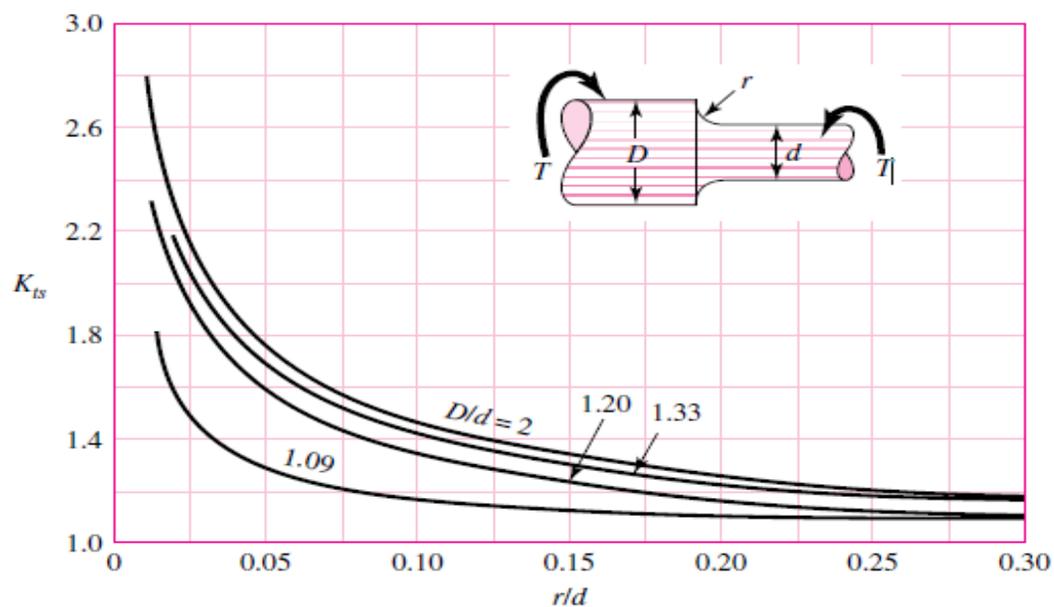


Figura 28. Eje redondo con filete en el hombro en torsión
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$K_{ts} = 1,8$$

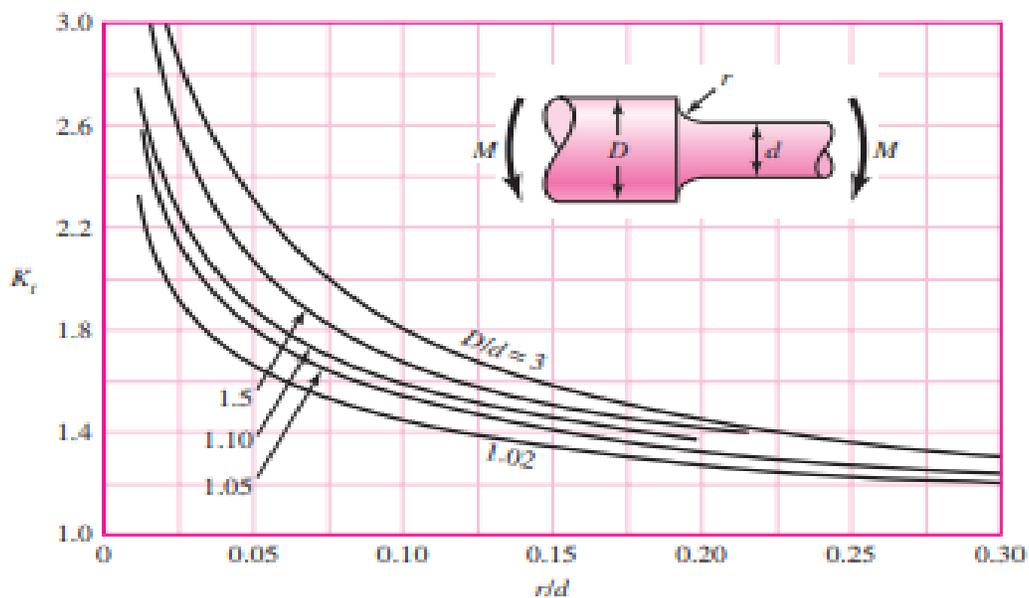


Figura 29. Eje redondo con filete en el hombro en flexión
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$K_t = 2,6$$

Ahora se obtiene el factor q de sensibilidad a la muesca en el caso de aceros y aleaciones de aluminio forjado UNS A92024-T sometidos a flexión (ver Figura 30), y el factor $q_{cortante}$ de sensibilidad a la muesca en caso de torsión (ver Figura 31).

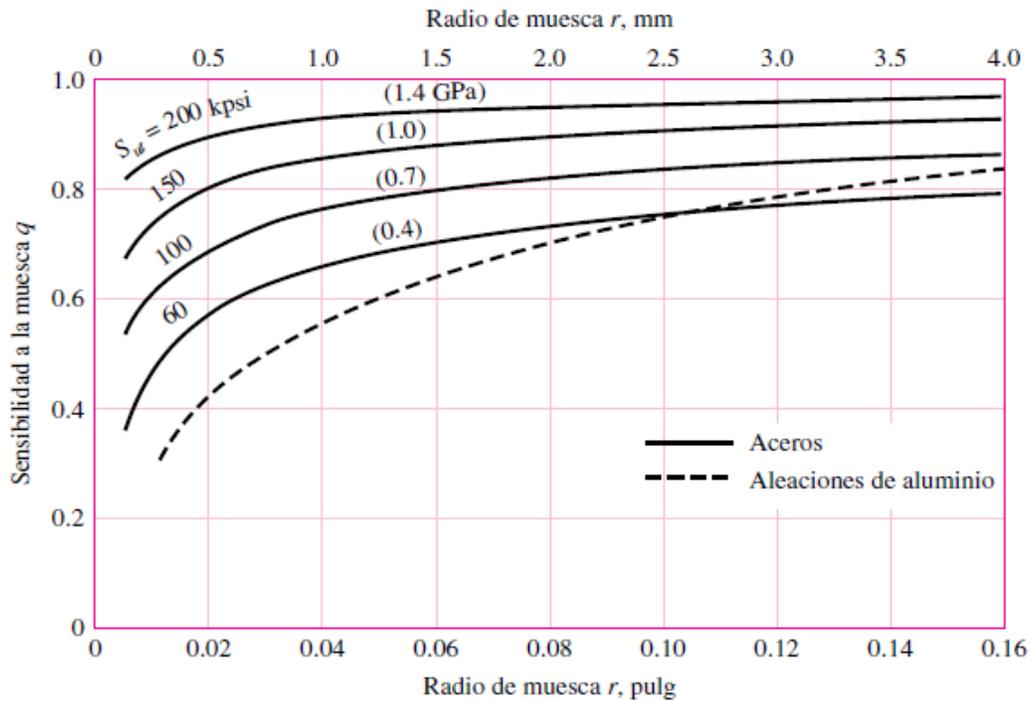


Figura 30. Sensibilidad a la muesca en caso de flexión inversa

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$q = 0,5$$

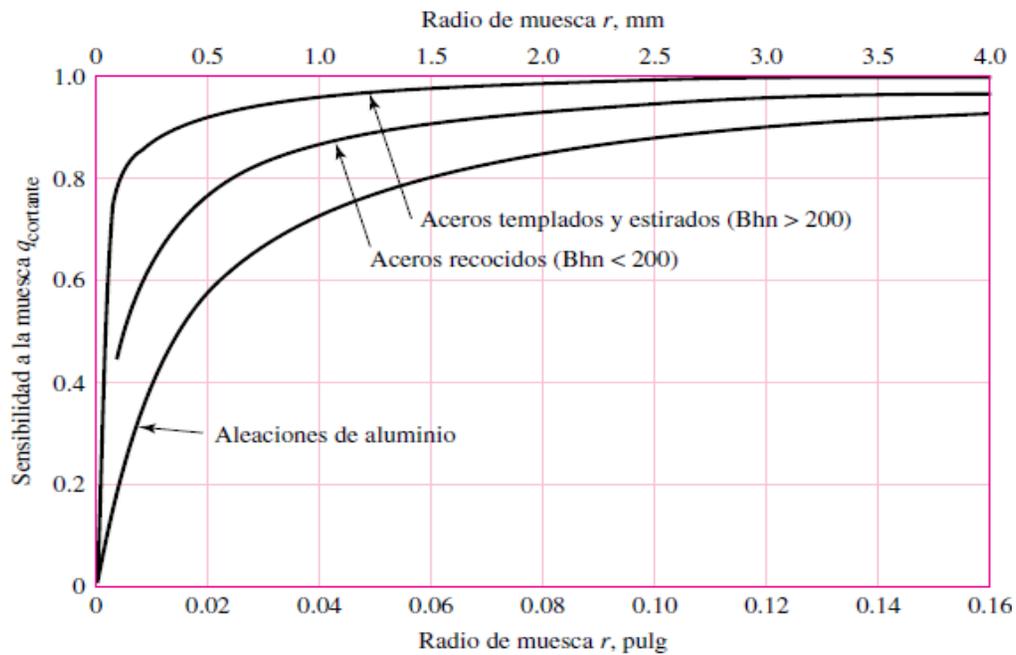


Figura 31. Sensibilidad a la muesca en caso de torsión inversa
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$q_{cortante} = 0,68$$

En el caso de la concentración de esfuerzo por flexión obtenemos el factor de concentración de esfuerzo de la siguiente forma:

Ecuación 60 Factor de concentración de esfuerzo por flexión

$$K_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$K_f = 1,8$$

Para el caso de torsión el factor de concentración de esfuerzo se obtiene de la siguiente forma:

Ecuación 61 Factor de concentración de esfuerzo por torsión

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(k_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1,54$$

Para el cálculo del diámetro del eje en el punto analizado se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 62 Diámetro del eje

$$d = \left(\left(\frac{32 * nd}{\pi} \left(K_f \frac{Ma}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fs} \frac{Tm}{S_y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Dónde:

- $Ma = Mr_{(263)} = 30281,08 \text{ N. mm}$
- $Tm = 9610,5 \text{ N. mm}$
- $nd = \text{factor de seguridad} = 1,3$

$$d = 16,18$$

Con este valor realizamos una segunda iteración siguiendo el mismo proceso donde los valores obtenidos en cada paso son los siguientes:

$$Se = 172,53 \text{ MPa}$$

$$D = 17$$

$$d = 16$$

$$\frac{D}{d} = 1,06$$

$$\frac{r}{d} = 0,016$$

$$k_{ts} = 1,7$$

$$k_t = 1,98$$

$$q = 0,5$$

$$q_{cortante} = 0,68$$

$$k_f = 1,49$$

$$k_{fs} = 1,476$$

$$d = \left(13,242 * \left(68388,96 + \frac{3}{4} * 3504 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 15,22$$

Asumimos un diámetro $\emptyset = 16$ mm en el punto más crítico del eje, tomando en cuenta los diámetros normalizados y el ensamble del robot las dimensiones del eje quedan de la siguiente forma (ver Figura 32):

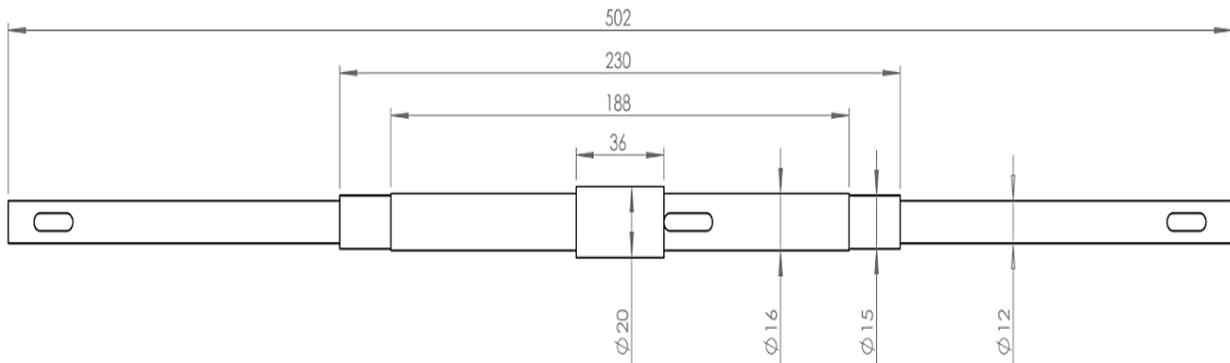


Figura 32. Diseño final del eje para las extremidades

Ahora calculamos el factor de seguridad final del eje en el punto crítico:

Ecuación 63 Factor de seguridad del eje

$$\frac{1}{nd} = \frac{32}{d^3 \pi} \left(\left(k_f * \frac{Na}{S_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(k_{fs} * \frac{Tm}{S_y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$nd (263) = 1,5368$$

El factor de seguridad en cada punto del eje es mayor al del punto crítico por lo cual se toma el diseño final del eje como válido.

3.2.6.3. Calculo de rodamientos

Se debe seleccionar los rodamientos adecuados para cada punto del eje mostrado en la Figura 33.

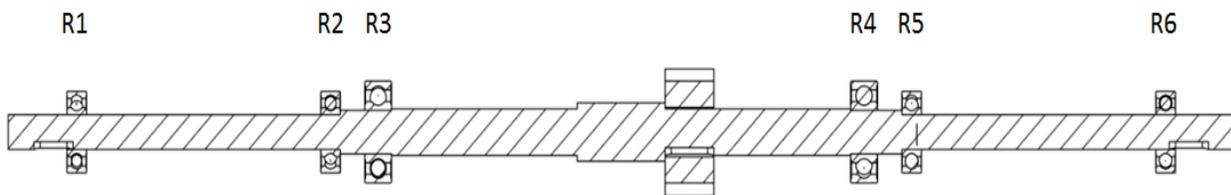


Figura 33. Disposición de rodamientos en el eje para de los brazos

Los rodamientos R3 y R4 son del mismo tipo sin embargo el rodamiento R4 soporta mayores cargas por lo cual el análisis se realiza en este punto para la sección del eje de 15mm de diámetro, la carga total aplicada en este punto se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 64 Carga total aplicada en el rodamiento R4

$$F_D = \sqrt{(307,88^2 + 112,06^2)} N$$

$$F_D = 327,63 N$$

Para la selección del coeficiente de seguridad utilizamos los siguientes datos (ver Tabla 21).

Tabla 21*Coefficiente de seguridad según su aplicación*

TYPE OF APPLICATION	LOAD FACTOR
Precision gearing	1.0 - 1.1
Commercial gearing	1.1 - 1.3
Applications with poor bearing seals	1.2
Machinery with no impact	1.0 - 1.2
Machinery with light impact	1.2 - 1.5
Machinery with moderate impact	1.5 - 3.0

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

El coeficiente de seguridad seleccionado es $nd = 1,5$ pues el robot estará expuesto a condiciones de impacto moderado.

La velocidad nominal de los motores utilizados es de 9 RPM, además se asume una vida útil $LD = 8000$ horas tomando en cuenta que el robot va a trabajar por intervalos cortos de tiempo, ya que es un prototipo y solo se utiliza para pruebas de concepto.

La clasificación de carga de catálogo C10 se calcula con la siguiente formula:

Ecuación 65 Clasificación de catálogo para el rodamiento R4

$$F_R = C_{10} = nd * F_D \left(\frac{X_D}{X_O + (\theta - X_D) - (1 - 0,98)^{\frac{1}{b}}} \right)^{\frac{1}{a}}$$

El parámetro a tiene el valor de 3 debido a que en el tipo de rodamientos a utilizar no existen cargas axiales, es de bolas.

El valor X_D se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 66 Vida de diseño

$$X_D = \frac{L}{L_{10}}$$

$$X_D = \frac{8000 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} * \frac{9 \text{ rev}}{\text{min}}}{10^6}$$

$$X_D = 4,32$$

Los parámetros de Weibull se obtienen de la siguiente tabla (ver Tabla 22).

Tabla 22

Parámetros de Weibull

FABRICANTE	VIDA NOMINAL, REVOLUCIONES	PARÁMETROS DE VIDAS NOMINALES		
		x_o	θ	b
1	90(10 ⁶)	0	4.48	1.5
2	1(10 ⁶)	0.02	4.459	1.483

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Ecuación 67 Parámetros de Weibull de vidas nominales

$$X_o = 0,02$$

$$\theta - X_o = 4,439$$

$$b = 1,483$$

Reemplazando todos los datos en la Ecuación 65 de la clasificación de carga de catálogo C10 se tiene:

$$C_{10} = 1,5 (327,63 \text{ N}) \left(\frac{4,32}{0,02 + 4,439 - (1 - 0,98)^{\frac{1}{1,483}}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{10} = 1149,7 \text{ N}$$

Tomando en cuenta el tamaño del eje, el valor de C10 y su disponibilidad en el mercado, el rodamiento más adecuado en este punto del eje es el DIN 625 6202 (ver Tabla 23) el cual posee un valor $C_{10} = 8200 \text{ N}$.

El mismo procedimiento se realiza para seleccionar los otros rodamientos del eje:

Ecuación 68 Carga total aplicada en el rodamiento R3

$$F_D = \sqrt{(218,75^2 + 62,84^2)} N$$

$$F_D = 227,59 N$$

Ecuación 69 Clasificación de catálogo para el rodamiento R4

$$C_{10} = 644,71 N$$

Rodamiento seleccionado DIN 625 6202

Ecuación 70 Carga total aplicada en el rodamiento R2 y R5

$$F_D = 7,36 N$$

Ecuación 71 Clasificación de catálogo para el rodamiento R2 y R5

$$C_{10} = 25,82 N$$

Rodamiento seleccionado DIN 625 6201

Ecuación 72 Carga total aplicada en el rodamiento R1 y R6

$$F_D = 7,36 N$$

Ecuación 73 Clasificación de catálogo para el rodamiento R1 y R6

$$C_{10} = 25,82 N$$

Rodamiento seleccionado DIN 625 6201

Ahora se realiza el cálculo para la selección de los rodamientos de los brazos, obteniendo primero la máxima fuerza aplicada por el motor en este punto:

Ecuación 74 Fuerza máxima aplicada

$$Wt_{max} = \frac{T_{motor}}{D} = \frac{9610,5 Nmm}{342,76 mm} = 28 N$$

En este caso el esfuerzo máximo se produciría en el caso de apoyar la rueda en el extremo exterior de tal forma que todo el esfuerzo soporte el rodamiento exterior.

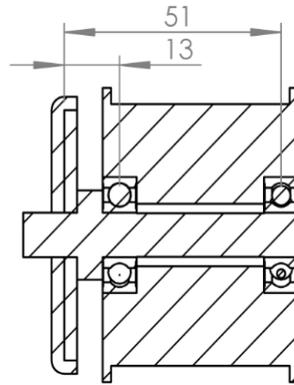


Figura 34. Rodamientos para las extremidades

Realizando la sumatoria de fuerzas se obtiene la siguiente reacción en el extremos de la rueda.

Ecuación 75 Sumatoria de fuerzas en los extremos de la rueda

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_B = F_D = 28 \text{ N}$$

$$C_{10} = 98.25 \text{ N}$$

Al analizar el caso en el cual todo el peso del robot este soportando únicamente una rueda del brazo (al bajar una grada de gran tamaño) se tomaría un valor $F_D = 147,1 \text{ N}$ correspondiente a todo el peso del robot, en este caso se tiene:

$$C_{10} = 516.19 \text{ N}$$

Utilizamos un eje de diámetro 12 mm y un rodamiento DIN 625 6201 (ver Tabla 24) por disponibilidad de material y facilidad de construcción.

Tabla 23
Rodamiento DIN 625 6202

CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO DIN 625 6202

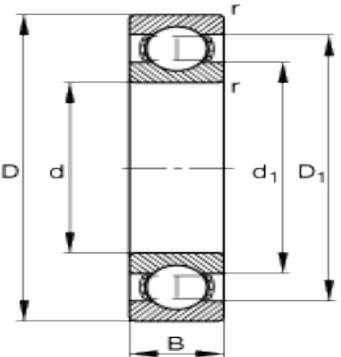
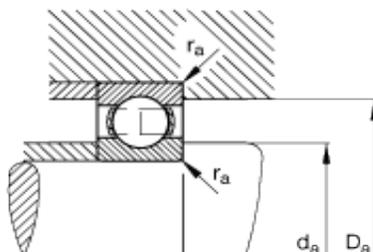
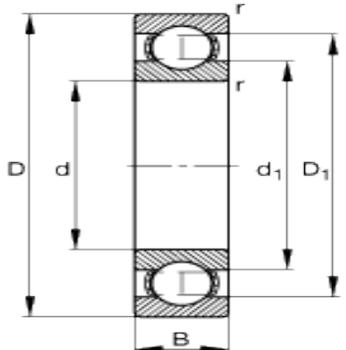
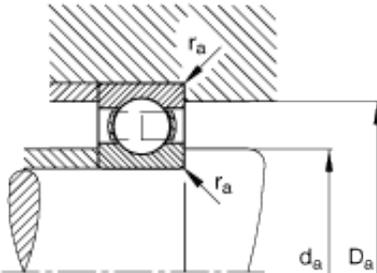
	d	15 mm
	D	35 mm
	B	11 mm
	D1	29,3 mm
	Da max	30,8 mm
	d1	21,1 mm
	da min	19,2 mm
	ra max	0,6 mm
	rmin	0,6 mm
	m: masa	0,043 kg
	Cr: Capacidad de carga dinámica básica, radial	8200 N
	C0r: Clasificación de carga estática básica, radial	3750 N
	Cur: Carga límite de fatiga, radial	197 N
	nG: Velocidad limite	30000 1/min
	n9r: Velocidad de referencia	19800 1/min

Tabla 24
Rodamiento DIN 625 6201

CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO DIN 625 6201

	d	12 mm
	D	32 mm
	B	10 mm
	D1	25,8 mm
	Da max	27,8 mm
	d1	18,3 mm
	da min	16,2 mm
	ra max	0,6 mm
	rmin	0,6 mm
	masa	0,037 kg
	Cr: Capacidad de carga dinámica básica, radial	7300 N
	C0r: Clasificación de carga estática básica, radial	3100 N
	Cur: Carga límite de fatiga, radial	156 N
	nG: Velocidad limite	33500 1/min
	n9r: Velocidad de referencia	22200 1/min

3.2.6.4. Cálculo de chavetas en el eje

El eje cuenta con tres chaveteras de las cuales una es para el engranaje y dos son para los brazos, las chavetas serán de acero AISI 303 (chaveta comercial).

Ecuación 76 Resistencia a la tracción del acero AISI 303

$$S_{ut} = 500 \text{ MPa}$$

Ecuación 77 Tensión admisible del acero AISI 303

$$\tau_{adm} = \frac{S_y}{2,25} = 222,22 \text{ MPa}$$

Tabla 25*Cuñas estándar y tamaños de tornillos prisioneros y métricas para ejes*

DIÁMETRO DEL EJE (IN)	ANCHO NOMINAL DE LA CUÑA (IN)	DIÁMETRO DEL TORNILLO PRISIONERO (IN)	DIÁMETRO DEL EJE (MM)	ANCHO X ALTO DE LA CUÑA (MM)
$0,312 < d \leq 0,437$	0,093	#10	$8 < d \leq 10$	3 x 3
$0,437 < d \leq 0,562$	0,125	#10	$10 < d \leq 12$	4 x 4
$0,562 < d \leq 0,875$	0,187	0,250	$12 < d \leq 17$	5 x 5
$0,875 < d \leq 1,250$	0,250	0,312	$17 < d \leq 22$	6 x 6
$1,250 < d \leq 1,375$	0,312	0,375	$22 < d \leq 30$	8 x 7
$1,375 < d \leq 1,750$	0,375	0,375	$30 < d \leq 38$	10 x 8
$1,750 < d \leq 2,250$	0,500	0,500	$38 < d \leq 44$	12 x 8
$2,250 < d \leq 2,750$	0,625	0,500	$44 < d \leq 50$	14 x 9
$2,750 < d \leq 3,250$	0,750	0,625	$50 < d \leq 58$	16 x 10
$3,250 < d \leq 3,750$	0,875	0,750	$58 < d \leq 65$	18 x 11
$3,750 < d \leq 4,500$	1,000	0,750	$65 < d \leq 75$	20 x 12
$4,500 < d \leq 5,500$	1,250	0,875	$75 < d \leq 85$	22 x 14
$5,500 < d \leq 6,500$	1,500	1,000	$85 < d \leq 95$	25 x 14

Dado que el eje en el punto donde está colocado el engranaje tiene 16 mm de diámetro el ancho de la chaveta seleccionada es de 5 mm (ver Tabla 25).

La longitud de la chaveta se calcula se la siguiente forma:

Ecuación 78 Longitud de chaveta del engranaje

$$L = \frac{D - d}{0,0208}$$

$$l = \frac{2T}{0 * W * \tau_{adm}}$$

$$l = \frac{2 * (9610,5) N mm}{16 mm * 5 mm * 222,22 MPa}$$

$$l = 1,08 \text{ mm}$$

La longitud calculada es demasiada pequeña debido a la alta resistencia del material por lo cual se utilizará una chaveta de 20 mm de longitud.

En el caso de los brazos, el eje en estos puntos tiene 12 mm de diámetro por lo que se selecciona la chaveta de 4 mm.

La longitud de la chaveta en este caso es:

$$T_{brazo} = 4462 \text{ N mm} = 45,5 \text{ Kg cm}$$

Ecuación 79 Longitud de la chaveta de los brazos

$$l = \frac{2 * (4462) \text{ N mm}}{12 \text{ mm} * 4 \text{ mm} * 222,22 \text{ MPa}}$$

$$l = 0,83 \text{ mm}$$

En este caso se utilizará una longitud de chaveta de 16 mm

3.2.6.5. Cálculo del prisionero

Para la selección del prisionero ubicado en las ruedas posteriores y en el engranaje se utiliza la Tabla 26.

Tabla 26

Potencia de sujeción de tornillos de presión de cabeza hueca

TAMAÑO (in)	PAR DE TORSIÓN DEL ASIENTO (lbf*in)	POTENCIA DE SUJECIÓN (lbf)
#0	1.0	50
#1	1.8	65
#2	1.8	85
#3	5	120

CONTINÚA



#4	5	160
#5	10	200
#6	10	250
#8	20	385
#10	36	540
(1/4)	87	1000
(5/16)	165	1500
(3/8)	290	2000
(7/16)	430	2500
(1/2)	620	3000
(9/16)	620	3500
(5/8)	1325	4000
(3/4)	2400	5000
(7/8)	5200	6000
1	7200	7000

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Ecuación 80 Factor de seguridad del prisionero

$n_d = 8$; Recomendación para cargas dinámicas

Ecuación 81 Fuerza de sujeción del prisionero

$$F_c = F_t * n_d$$

$$F_c = 480,53 * 8 N$$

$$F_c = 3844,24 N$$

El tornillo prisionero seleccionado es el de $\varnothing=6\text{mm}$.

El esfuerzo cortante en la perforación del prisionero de las ruedas traseras se calcula basándose en los datos que proporciona la tabla de factores aproximados de concentración del esfuerzo, de una barra redonda o un tubo con un agujero redondo transversal (ver Tabla 27), con carga en torsión (ver Figura 35).

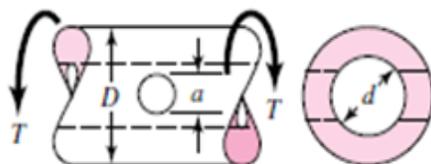


Figura 35. Barra redonda con agujero con carga en torsión
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Tabla 27

Factores aproximados de concentración de esfuerzos con carga en torsión

a/D	d/D									
	0,9		0,8		0,6		0,4		0	
	A	Kb								
0,05	0,96	1,78							0,95	1,77
0,075	0,95	1,82							0,93	1,71
0,1	0,94	1,76	0,93	1,74	0,92	1,72	0,92	1,7	0,92	1,68
0,125	0,91	1,76	0,91	1,74	0,9	1,7	0,9	1,67	0,89	1,64
0,15	0,9	1,77	0,89	1,75	0,87	1,69	0,87	1,65	0,87	1,62
0,175	0,89	1,81	0,88	1,76	0,87	1,69	0,86	1,64	0,85	1,6
0,2	0,88	1,96	0,86	1,79	0,85	1,7	0,84	1,63	0,83	1,58
0,25	0,87	2	0,82	1,86	0,81	1,72	0,8	1,63	0,79	1,54
0,3	0,8	2,18	0,78	1,97	0,77	1,76	0,75	1,63	0,74	1,51
0,35	0,77	2,41	0,75	2,09	0,72	1,81	0,69	1,63	0,68	1,47
0,4	0,72	2,67	0,71	2,25	0,68	1,89	0,64	1,63	0,63	1,44

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Ecuación 82 Factores mecánicos de barra redonda con agujero con carga en torsión

$$\frac{d}{D} = \frac{8}{22} = 0,363$$

$$\frac{a}{D} = \frac{6}{22} = 0,272$$

$$a = 0,8 \quad k_{ts} = 1,63$$

Ecuación 83 Segundo momento polar del área

$$J_{neto} = \frac{\pi a(D^4 - d^4)}{32}$$

$$J_{neto} = \frac{\pi(0,8)(22^4 - 8^4)}{32}$$

$$J_{neto} = 18076,72 \text{ mm}^4$$

Ecuación 84 Esfuerzo cortante nominal

$$\tau_o = \frac{TD}{2J_{neto}}$$

$$\tau_o = \frac{9610,5 \text{ N mm} (22 \text{ mm})}{2 (18076,72 \text{ mm}^4)}$$

$$\tau_o = 5,84 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante nominal es mínimo, el duraluminio resiste los esfuerzos generados.

3.2.7. Análisis mecánico del chasis y los brazos

Se hace un análisis estático asistido por computador con el fin de validar el diseño tanto del chasis y los brazos en condiciones de esfuerzos máximos.

Para el análisis del chasis se asume que todo el peso del robot (15 N) se apoya en cada una de sus caras, a pesar de que esto no sucede en el uso normal del robot. No se tomó en cuenta los apoyos de la tapa y demás componentes pues estos ayudan a reforzar la estructura. El material utilizado para la estructura y los brazos es aluminio AISI 1100 con resistencia última de 125 Mpa y límite elástico de 122 Mpa.

Este análisis se realizó en un caso hipotético de máximo esfuerzo a fin de validar totalmente la estructura, ya que al ser el soporte para todos los elementos del robot es el componente más importante.

Se realizaron múltiples simulaciones en la estructura del robot en las cuales se varió el número de elementos de la malla y se obtuvieron los valores de esfuerzo expresados en la Figura 36, se empleó mallas basadas en curvatura para las simulaciones.

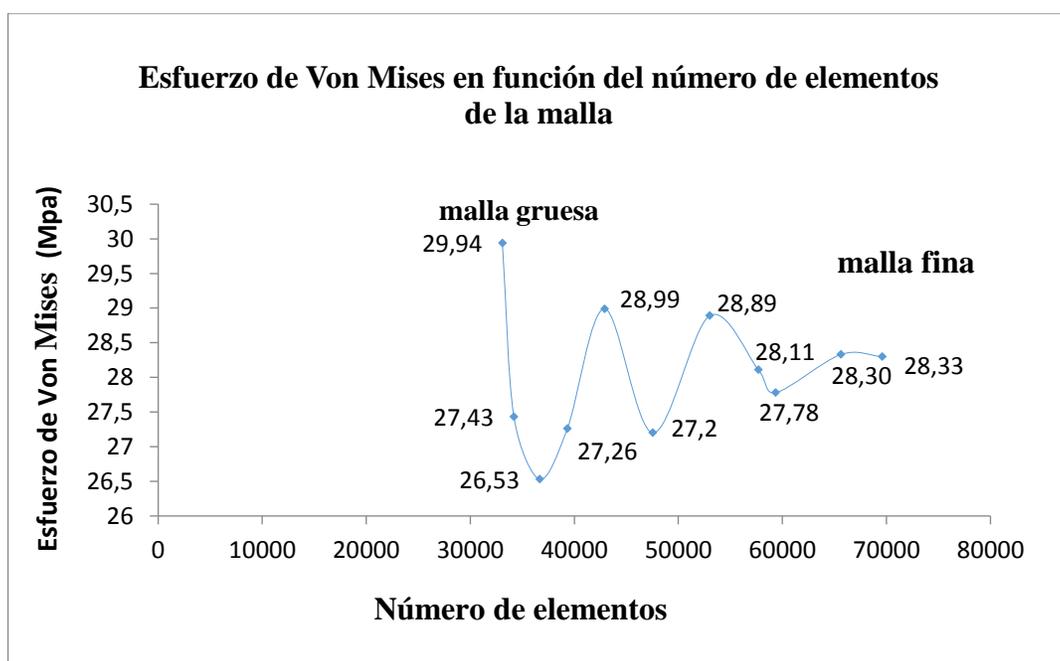


Figura 36. Análisis de convergencia del mallado en la estructura

De las simulaciones realizadas se concluye que los valores de esfuerzo convergen a un valor cercano a 28,33 Mpa en el rango de número de elementos permitido por el software utilizado, además los valores obtenidos son muy cercanos entre sí. Para las simulaciones de la estructura se empleó el mallado correspondiente al esfuerzo de Von Mises de 28,33 Mpa, con el fin de evaluar el diseño en las condiciones de esfuerzo más realista.

Mediante las simulaciones se puede visualizar los resultados de tensión de Von Mises (ver Figura 37), deformación (ver Figura 38) y factor de seguridad (ver Figura 39) para el caso de aplicación de la fuerza en la cara lateral del chasis del robot. En este caso se colocó la sujeción en una de las caras laterales de la estructura y la fuerza de 15 N en la cara opuesta a la sujeción, a fin de simular el apoyo de todo el peso del robot sobre una cara lateral de la estructura.

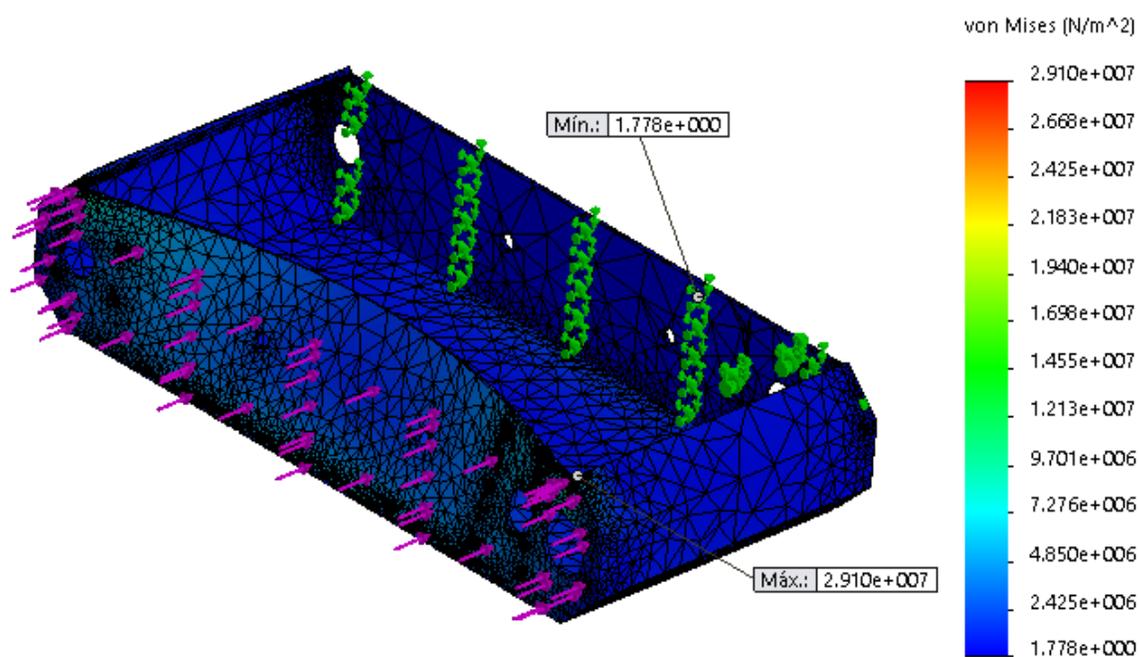


Figura 37. Tensión de Von Mises para carga aplicada en la cara lateral del chasis

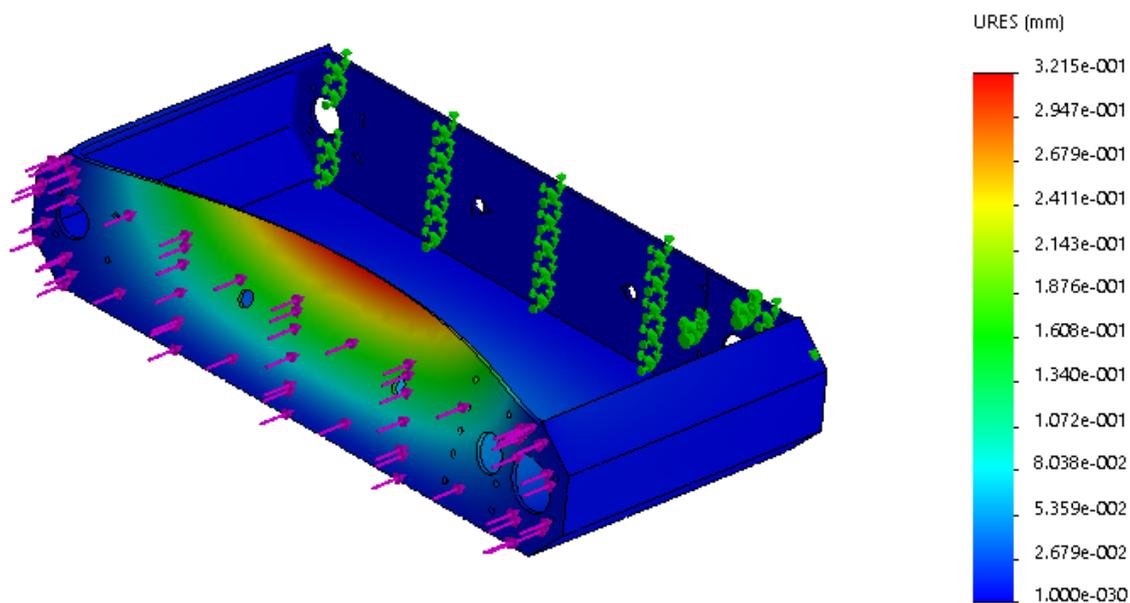


Figura 38. Deformación para carga aplicada en la cara lateral del chasis

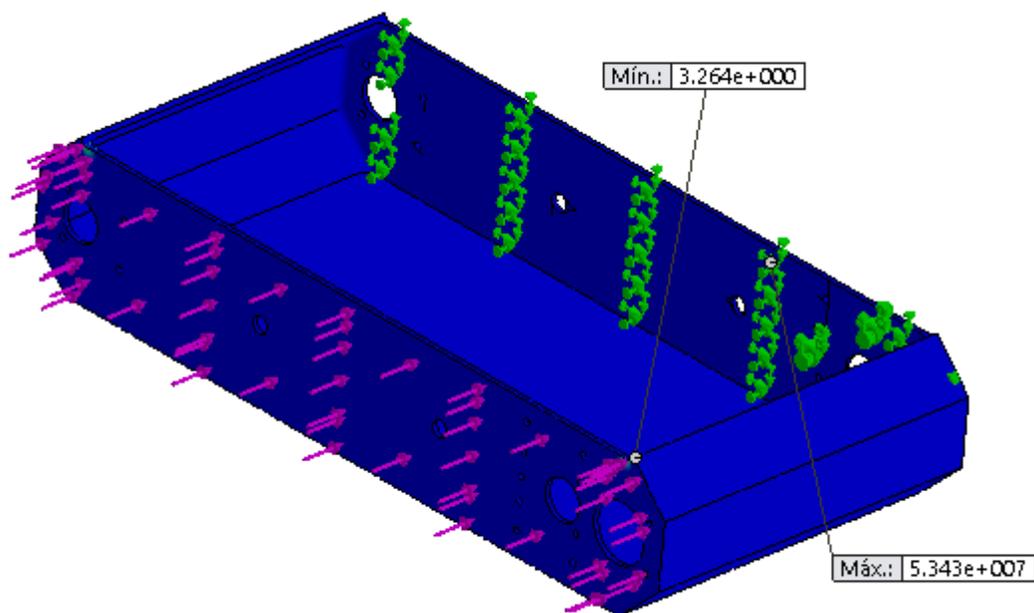


Figura 39. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara lateral del chasis

Como se puede observar el factor de seguridad mínimo es de 3,26 por lo cual el material seleccionado y el diseño son adecuados para resistir cargas lateralmente. La deformación es mínima y no afectaría en el funcionamiento del robot. Este valor de deformación una vez colocada la tapa y demás componentes se vería reducido en gran medida.

En las simulaciones se puede visualizar los resultados de tensión de Von Mises (ver Figura 40), deformación (ver Figura 41) y factor de seguridad (ver Figura 42) para el caso de aplicación de la fuerza en la cara frontal del chasis del robot. En este caso la sujeción se colocó en una de las caras frontales del robot y la fuerza de 15 N en la cara contraria a esta, con el fin de simular el apoyo de todo el peso del robot sobre una de las caras frontales de la estructura.

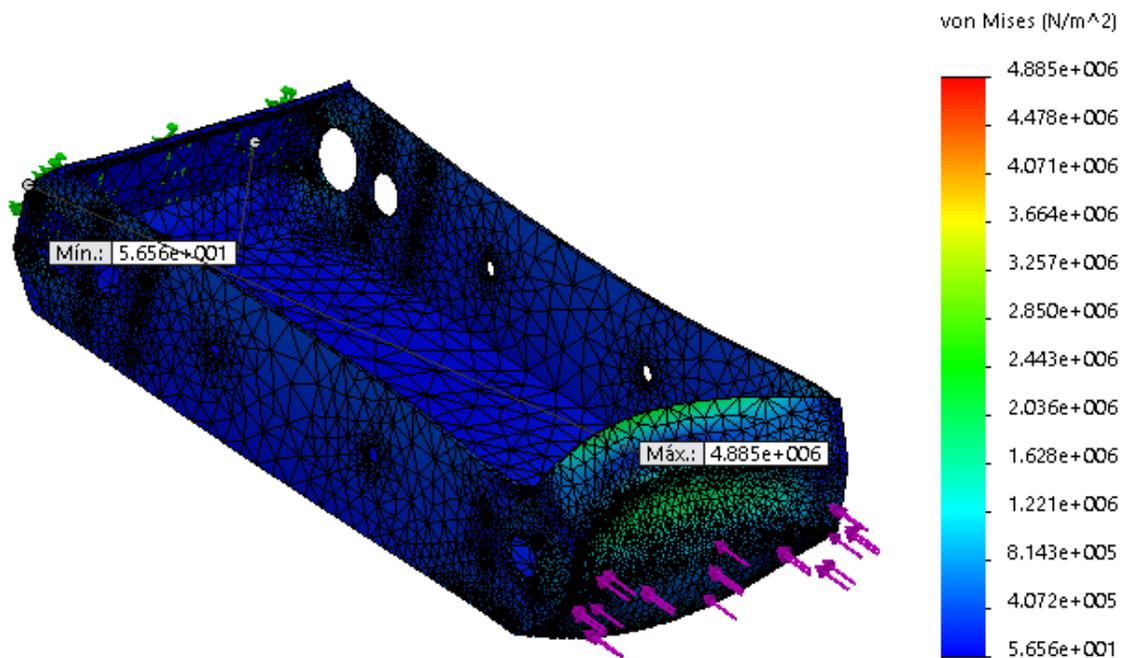


Figura 40. Tensión de von mises para carga aplicada en la cara frontal del chasis

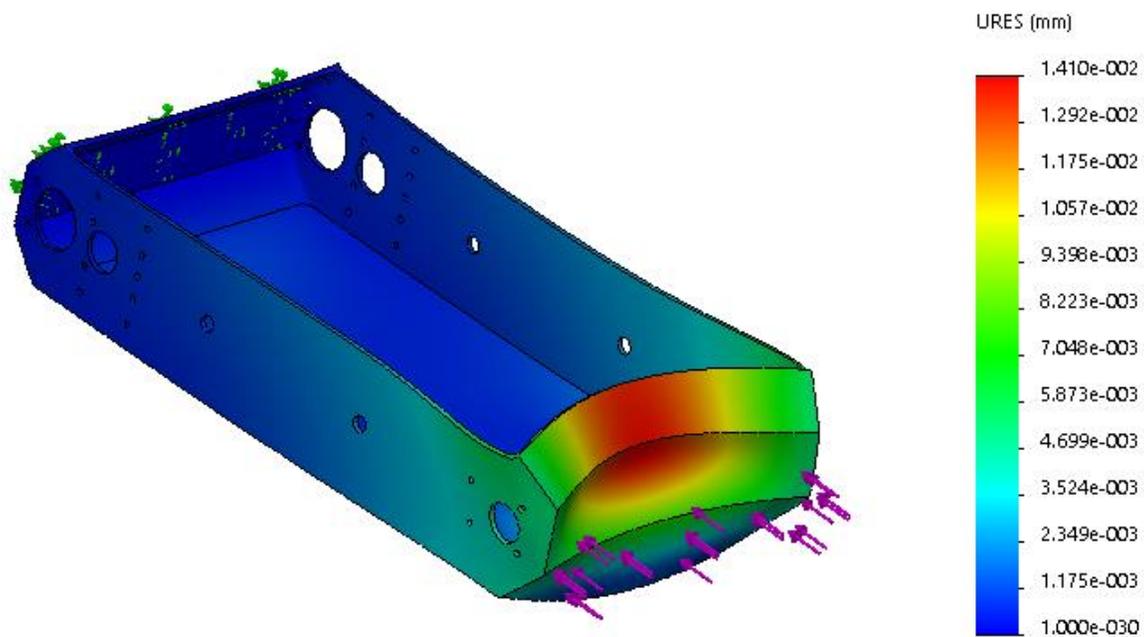


Figura 41. Deformación para carga aplicada en la cara frontal del chasis

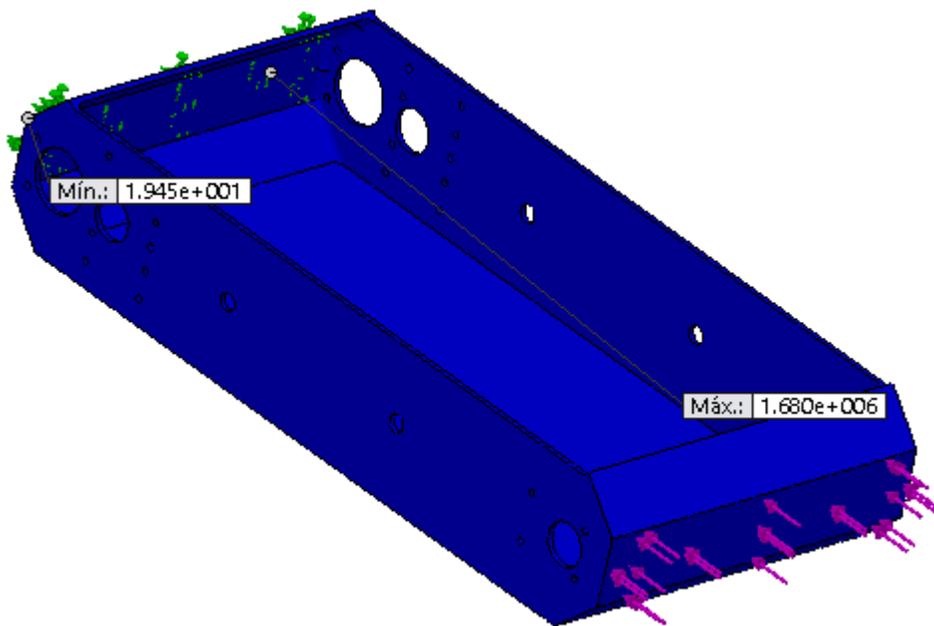


Figura 42. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara frontal del chasis

Como se observa en el caso de fuerzas aplicadas en la cara frontal el factor de seguridad es bastante elevado y la deformación es mínima, lo cual supone que este tipo de fuerzas no afectarán mayormente a la estructura del robot.

En las simulaciones se puede visualizar los resultados de tensión de Von Mises (ver Figura 43), deformación (ver Figura 44) y factor de seguridad (ver Figura 45) para el caso de aplicación de la fuerza en la cara inferior del chasis del robot. En este caso las sujeciones se colocaron en los extremos de las paredes laterales de la estructura y la fuerza de 15 N en la base del robot, esto con el fin de simular el apoyo de todo el peso del robot sobre la base de la estructura.

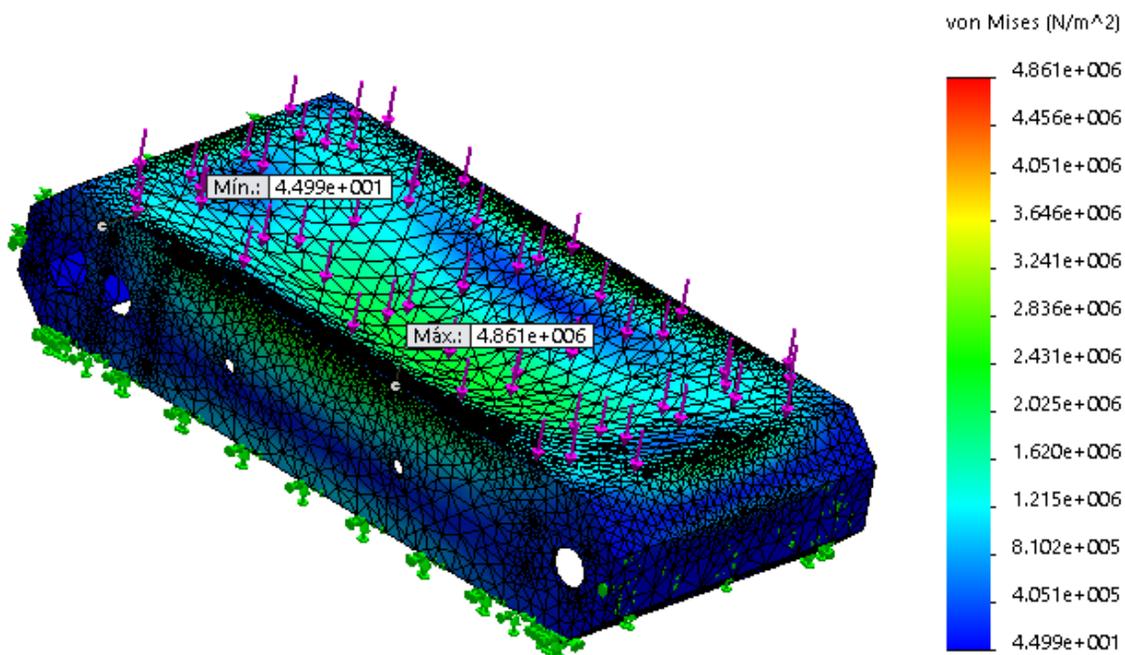


Figura 43. Tensión de von mises para carga aplicada en la cara inferior del chasis

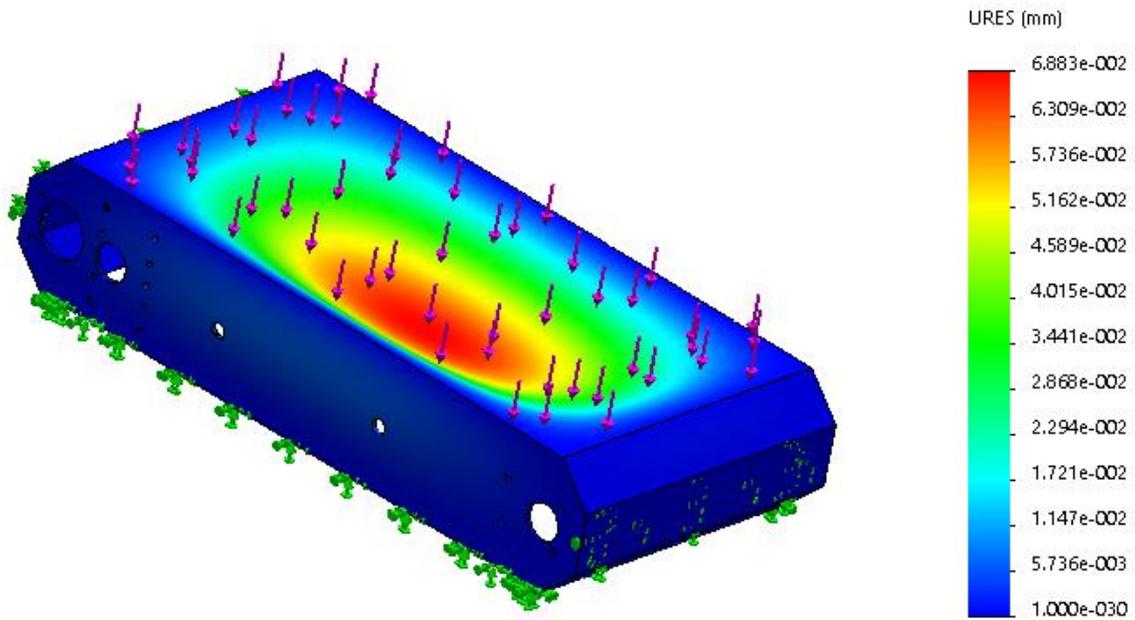


Figura 44. Deformación para carga aplicada en la cara inferior del chasis

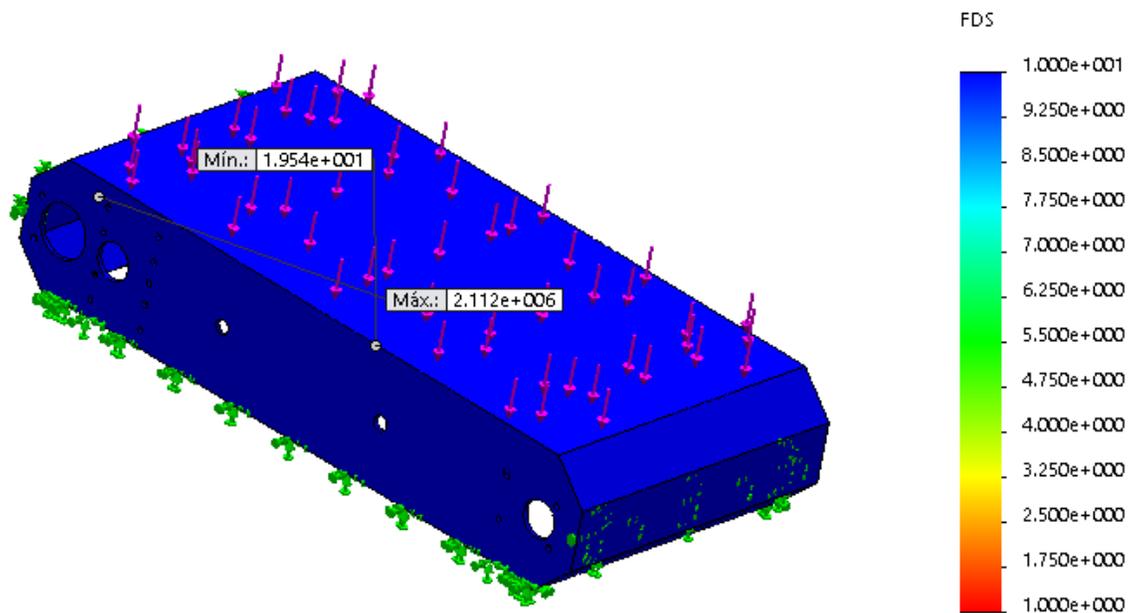


Figura 45. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara inferior del chasis

En el caso de la aplicación de la carga en la cara inferior del chasis, el factor de seguridad también es elevado y la deformación es mínima, tanto el material como el diseño son adecuados para este tipo de cargas.

Las extremidades o brazos constituyen un componente importante para la estructura del robot ya que le permiten subir gradas. Se hizo un análisis de carga lateral asumiendo una fuerza de 20 N, en funcionamiento normal del robot los brazos no deberían recibir cargas laterales, sin embargo, se analiza con el fin de validar el diseño ante eventuales fuerzas moderadas aplicadas de esta forma.

Se realizaron múltiples simulaciones en los brazos del robot en las cuales se varió el número de elementos de la malla y se obtuvieron los valores de esfuerzo expresados en la Figura 46, se utilizó mallas basadas en curvatura para las simulaciones.

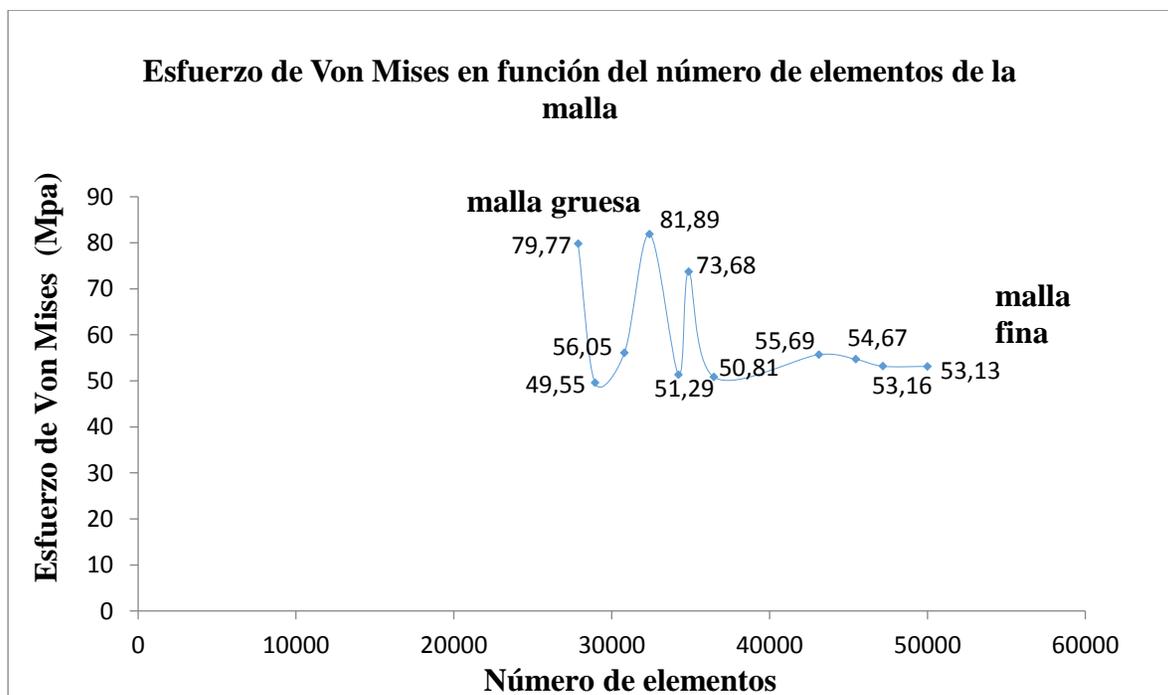


Figura 46. Análisis de convergencia del mallado en los brazos

De las simulaciones realizadas se concluye que el esfuerzo converge a un valor aproximado de 53,13 Mpa, esto en el rango de número de elementos permitido por el software utilizado. Para las simulaciones de la estructura se utilizó el mallado que generó el esfuerzo de Von Mises de 53.13 Mpa, esto con el fin evaluar el diseño en las condiciones más realistas.

En las simulaciones se puede visualizar los resultados de tensión de Von Mises (ver Figura 47), deformación (ver Figura 48) y factor de seguridad (ver Figura 49) para el caso de aplicación de la fuerza de forma lateral en los brazos o extremidades del robot. En este caso la sujeción se colocó en la perforación del eje central del brazo, con el fin de simular la distribución de la fuerza en este punto ya que es el único punto de apoyo del brazo en estas condiciones de simulación. La fuerza de 20 N se lo coloco en la perforación de la rueda delantera.

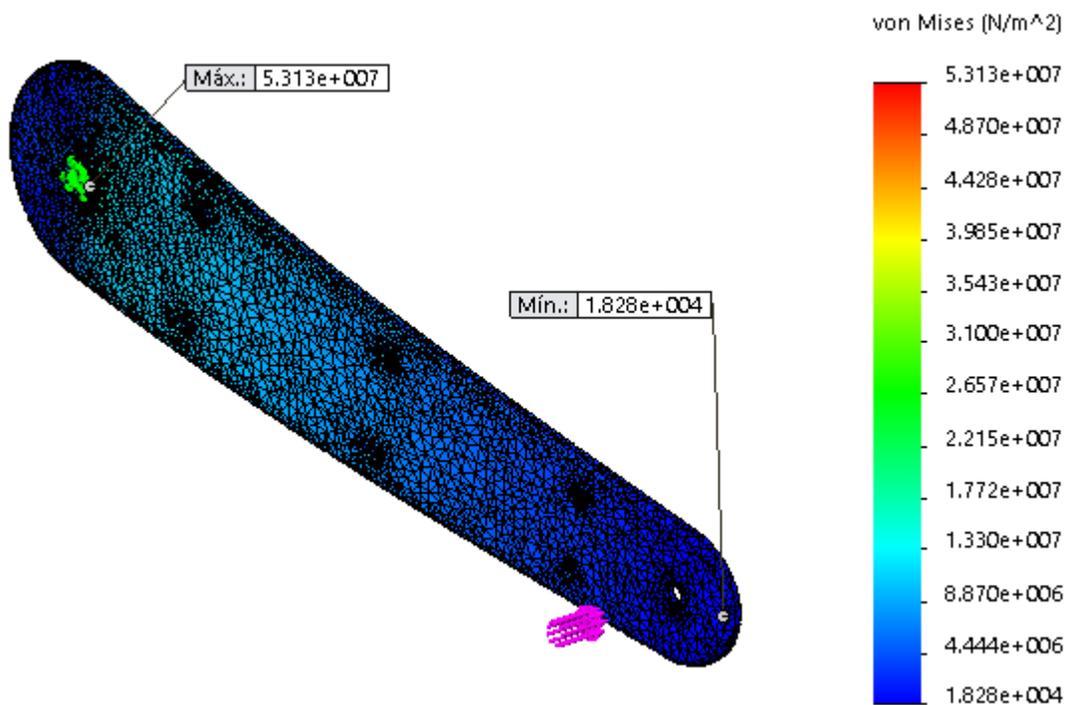


Figura 47. Tensión de Von Mises para carga lateral aplicada en los brazos del robot

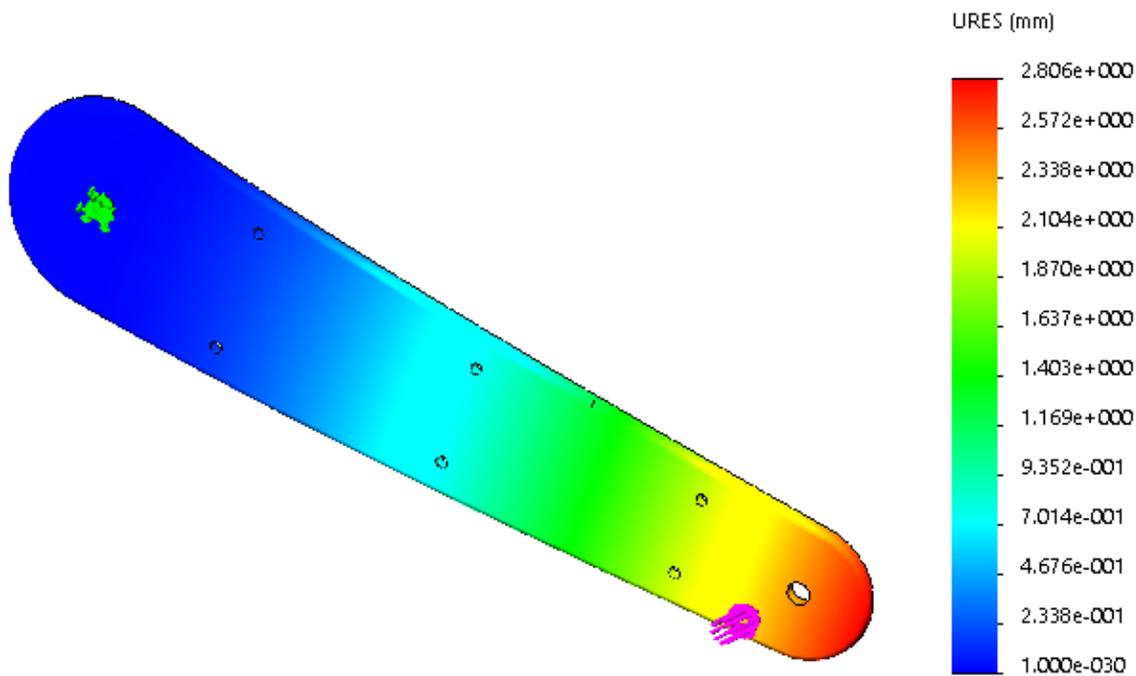


Figura 48. Deformación para carga lateral aplicada en los brazos del robot

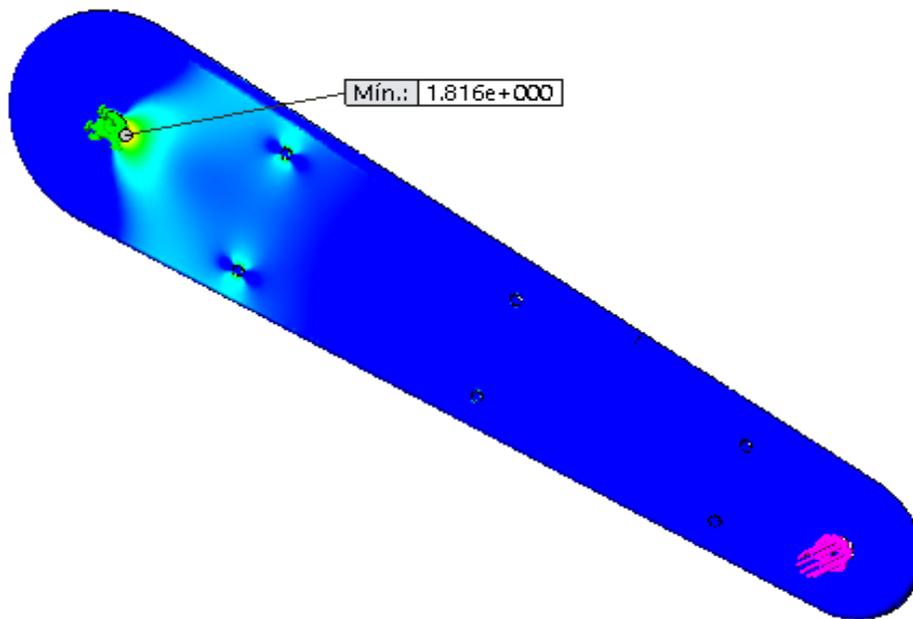


Figura 49. Factor de seguridad para carga lateral aplicada en los brazos del robot

Como se puede observar, la fuerza aplicada generaría en el extremo una deformación de 2,806 mm lo cual es aceptable. Como se dijo anteriormente este tipo de cargas en condiciones normales es prácticamente inexistente, en caso de producirse los brazos tendrían un factor de seguridad de 1,816 con lo cual se valida el material seleccionado.

La fuerza producida por los motores se consideró para el caso en el cual solo una de las ruedas reciba dicha fuerza, lo que sería un caso inusual en el uso del robot. En las simulaciones se puede visualizar los resultados de tensión de Von Mises (ver Figura 50), deformación (ver Figura 51) y factor de seguridad (ver Figura 52) para el caso de aplicación de la fuerza de en la cara inferior de los brazos del robot. En este caso la sujeción se colocó en la perforación del eje central del brazo y la fuerza de 67.17 N producida por el motor se coloca en la perforación de la rueda delantera.

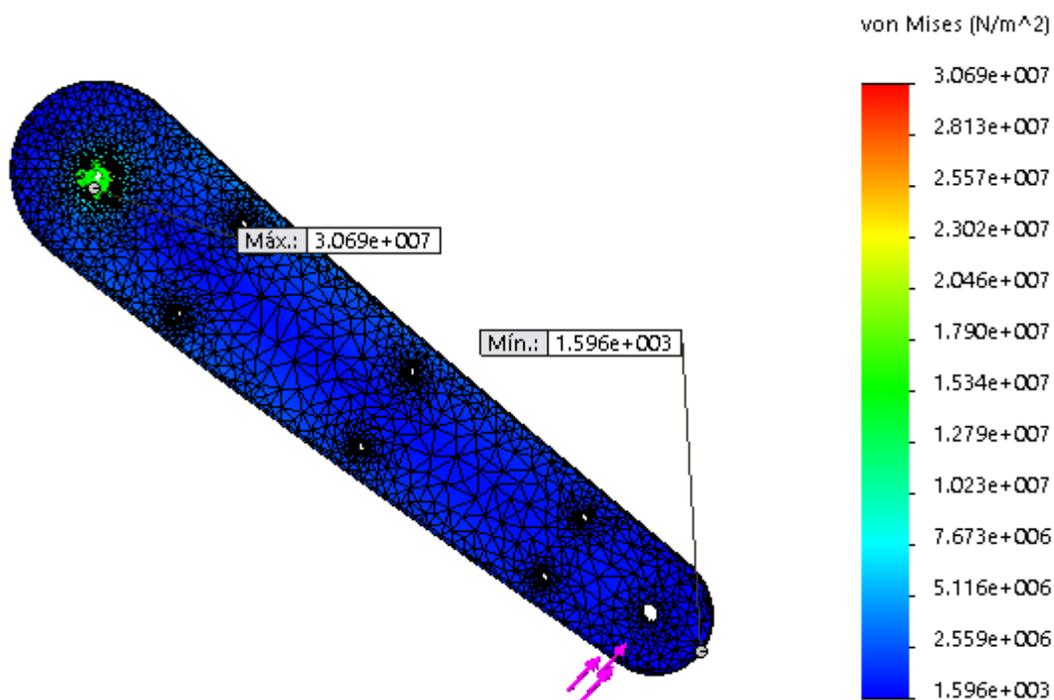


Figura 50. Tensión de Von Mises para carga aplicada en la cara inferior de los brazos

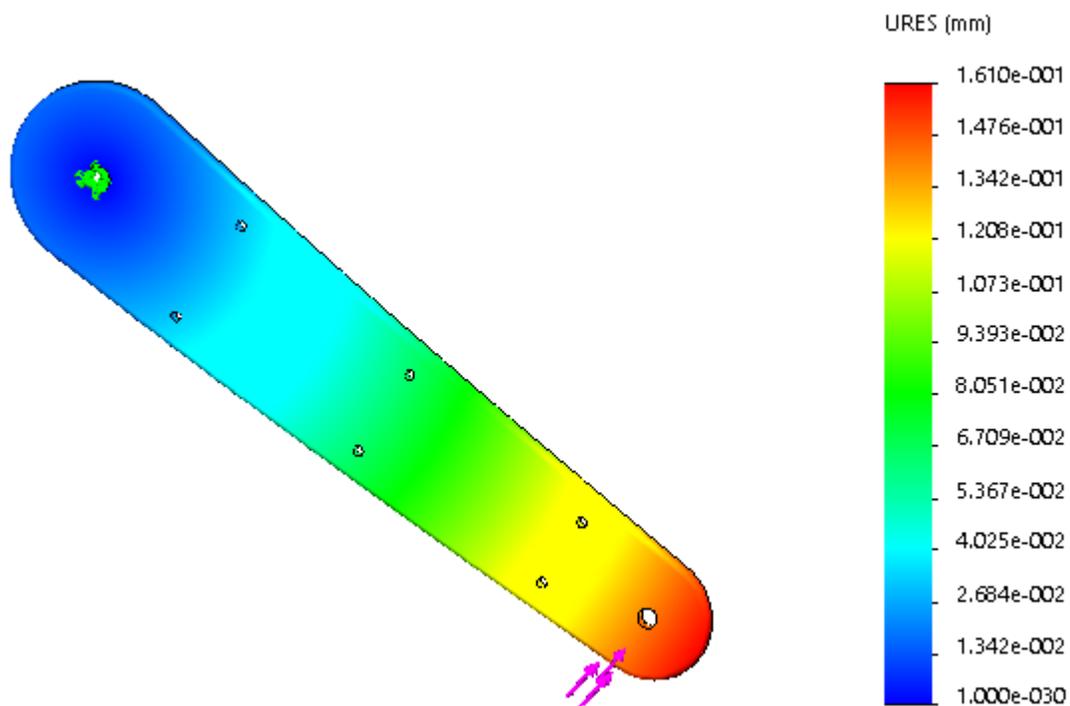


Figura 51. Deformación para carga aplicada en la cara inferior de los brazos del robot

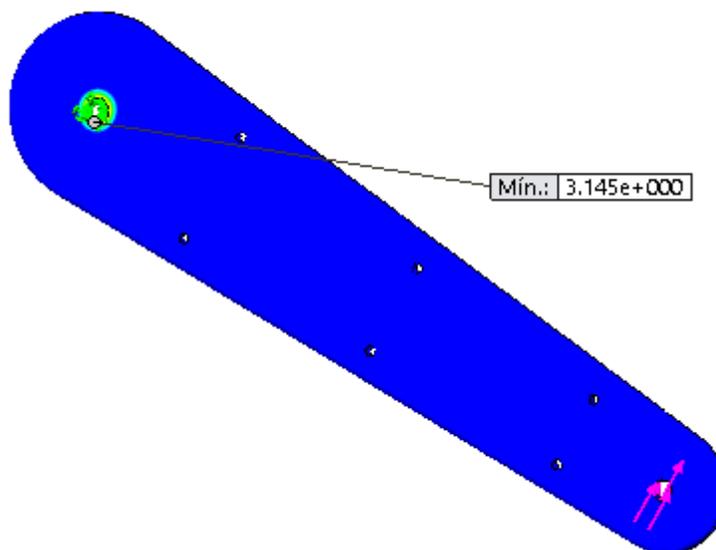


Figura 52. Factor de seguridad para carga aplicada en la cara inferior de los brazos del robot

En este caso el factor de seguridad es levemente elevado y tanto la tensión como la deformación generados no son considerables, con lo cual el diseño y material son adecuados.

3.3. Módulo 2. Locomoción

3.3.1. Arquitectura de control

El siguiente sistema (ver Figura 53) recibe, procesa y ejecuta las órdenes ingresadas por el usuario del robot.

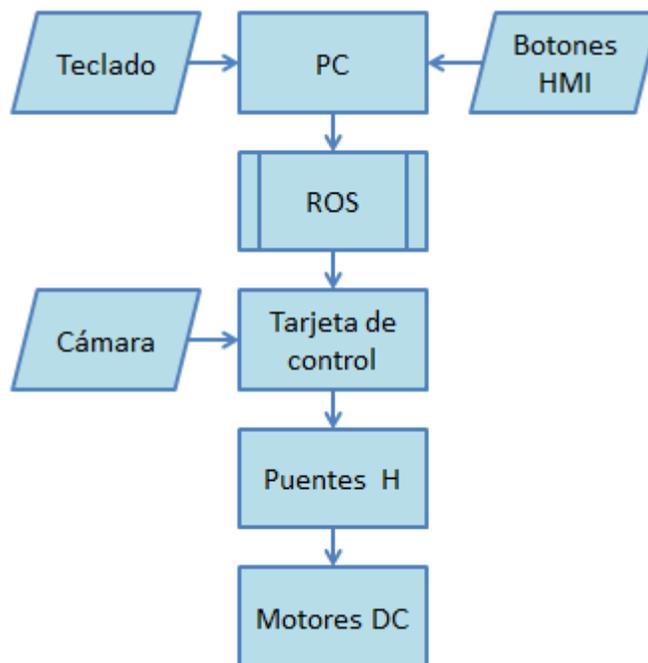


Figura 53. Arquitectura del sistema del vehículo todo terreno

Los parámetros de movimiento podrán ser modificados mediante una HMI diseñada para ser compatible con Ubuntu y Python, el movimiento del robot será controlado mediante el teclado del computador previo acceso a esta función en la HMI.

El control del robot mediante el teclado se realiza a través de un nodo de ROS el cual lee constantemente todas las teclas pulsadas, posteriormente procesa, ordena y envía los datos hacia un nodo principal que mediante programación verifica que el acceso se haya realizado en la HMI, de ser este el caso envía los datos mediante Wi-Fi hacia la tarjeta de control para realizar en el robot las operaciones requeridas por el usuario. Se desarrollaron dos nodos, uno para la PC y otro para la tarjeta de control con el objetivo de verificar en todo momento que exista conexión entre la PC y el robot, de no ser este el caso el robot se detiene hasta que vuelva a tener conexión con el computador.

El robot consta de una cámara en su parte frontal que permite visualizar las imágenes de la cámara previo acceso a esta función en la HMI.

3.3.2. Tarjeta de control

Este proyecto utilizará la tarjeta de control Raspberry Pi 3 modelo B (ver Figura 54), en la cual se instalará el sistema operativo Ubuntu 16.04 Xenial, a su vez se instalará ROS y Python en el sistema operativo. Las principales características técnicas de la Raspberry Pi 3 modelo B se resumen en la Tabla 28.

Tabla 28*Características de la tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B***CARACTERÍSTICAS DE LA RASPBERRY PI 3 MODELO B**

Procesador	Broadcom BCM2837, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
Frecuencia de reloj	1,2 GHz
GPU	VideoCore IV 400 MHz
Memoria	1GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad inalámbrica	2.4GHz IEEE 802.11.b/g/n, Bluetooth 4.1
Conectividad de red	Fast Ethernet 10/100 Gbps
Puertos	GPIO 40 pines
	HDMI
	4 x USB 2.0
	CSI (cámara Raspberry Pi)
	DSI (pantalla tácil)
	Toma auriculares / vídeo compuesto
Micro SD	
Entrada de poder	Enchufe Micro USB 5V1, 2.5A
Temperatura de operación	0-50°C

**Figura 54.** Raspberry Pi 3 modelo B

Fuente: (Raspberry Pi)

3.3.3. Puente H

El puente H empleado es el BTS7960 (ver Figura 55), este puente H fue seleccionado por sus excelentes características técnicas (ver Tabla 29), las cuales son suficientes para controlar los tres motores utilizados, además es de fácil adquisición y uso, permitiendo una fácil inspección y reemplazo en caso de ser necesario.

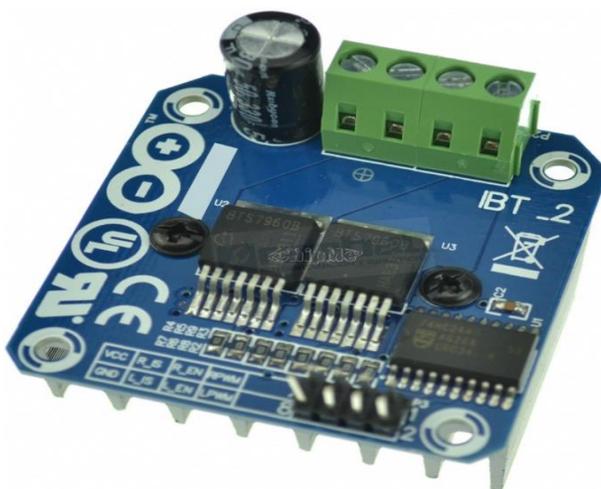


Figura 55. Puente H BTS 7960
Fuente: (Rambal - Automatización y robótica)

Tabla 29

Características técnicas del puente H BTS7960

Características del puente H BTS7960

Voltaje de funcionamiento de 5,5 a 27 Voltios

Corriente de reposo de 7 μ A a 25 °C

Capacidad de PWM de hasta 25 kHz combinada con activación libre

Protección: Sobrecorriente

Intensidad máxima: 43 A

Diagnóstico de la bandera de estado con capacidad de detección de corriente

Bloqueo de sobretensión

Circuito de control con entradas de nivel lógico.

3.3.4. Control de motor

La velocidad en que los motores giran está controlada mediante PWM, manteniendo la frecuencia constante y variando el ciclo de trabajo entre 0% y 100% (ver Figura 56). Las señales eléctricas son enviadas a través de los pines GPIO de la Raspberry Pi 3 hacia los puentes H y estos a su vez alimentan a los motores haciéndolos girar en la dirección y velocidades requeridos por el usuario del robot.

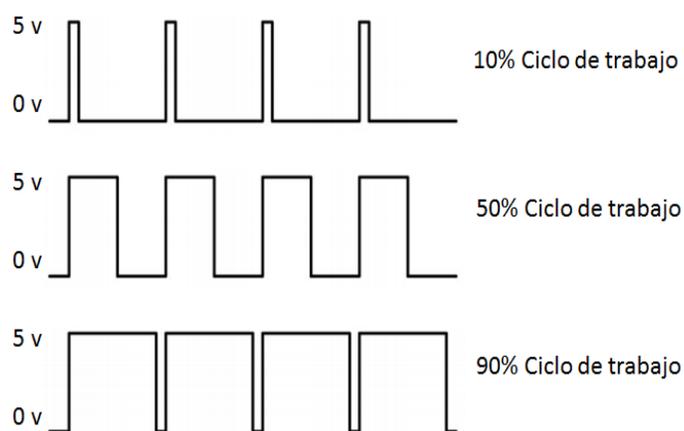


Figura 56. Señales PWM con distintos porcentajes de trabajo

3.4. Módulo 3. Monitoreo

El monitoreo se realiza mediante una cámara que permite la visualización del entorno, los datos son enviados a un PC el cual a través de una interfaz permite al operador la visualización de dicho entorno.

3.4.1. Subsistema 1. Cámara

El módulo de cámara a utilizarse es el Raspberry Pi Camera Module V2 (ver Figura 57), que fue seleccionado por su facilidad de conexión con la tarjeta de control Raspberry Pi 3 a través del conector CSI. Además, ofrece excelentes características de tamaño, peso y resolución adecuadas para el robot. Las características principales del módulo de cámara se describen a continuación (ver Tabla 30).



Figura 57. Raspberry Pi Camera Module V2

Tabla 30

Características del Camera Module V2

RASPERRY PI CAMERA MODULE V2	
Tamaño	Alrededor de $25 \times 24 \times 9$ mm
Peso	3 g
Resolución inmóvil	8 Megapíxeles
Modos de video	1080p30, 720p60 y 640×480 p60/90
Integración de Linux	V4L2 driver disponible
API de programación C	Open MAX IL y otros disponibles

CONTINÚA 

Sensor	Sony IMX219
Resolución del sensor	3280 × 2464 píxeles
Área de imagen del sensor	3.68 x 2.76 mm (4.6 mm diagonal)
Tamaño de píxel	1.12 μm x 1.12 μm
Tamaño óptico	1/4"
Longitud focal	3.04 mm
Campo de visión horizontal	62.2 grados
Campo de visión vertical	48.8 grados
Relación focal (F-Stop)	2.0

3.4.2. Subsistema 2. Interfaz

El diseño de la interfaz de usuario fue elaborado en el programa Qt Designer y la programación mediante Python.

3.4.2.1. Qt Designer

Es un software para el diseño y construcción de interfaces de usuario y aplicaciones multiplataforma. Este software permite crear widgets y formularios que se integran con la programación, utiliza señales Qt y un mecanismo de ranuras para manipular las características de los componentes gráficos. Cada una de las propiedades establecidas con Qt Designer se puede modificar de forma dinámica mediante programación.

3.4.2.2. Ventajas ofrecidas por Qt Designer:

- Es de código abierto.
- Utiliza un editor visual.
- Posee todas las herramientas necesarias para la elaboración de interfaces sin necesidad de cambiar de aplicaciones.
- Todas las herramientas de Qt se pueden descargar y utilizar gratuitamente.
- Permite el desarrollo de aplicaciones multiplataforma.
- Es un software muy confiable y sencillo de utilizar.
- Se agregan nuevas herramientas regularmente.
- Existe mucha documentación relacionada con el uso de Qt Designer.

3.4.2.3. Diseño de la interfaz grafica

La ventana de acceso de la interfaz permite la verificación del usuario y la contraseña (ver Figura 58), alumno y 123 respectivamente, necesarios para acceder a las ventanas de operación del robot. Una vez ingresados el usuario y contraseña correctamente, se accederá a la siguiente ventana de la interfaz, en caso de ingresar incorrectamente los campos se desplegará una ventana emergente la cual avisará al usuario que los datos ingresados no son correctos (ver Figura 59).



A screenshot of a login dialog window titled "Dialog". At the top center is the logo of ESPE (Universidad de las Fuerzas Armadas), which includes a crest and the text "ESPE UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA". Below the logo, there are two input fields: "Usuario:" with the text "alumno" and "Contraseña:" with the text "123". At the bottom, there are two buttons: "Acceder" (orange) and "Salir" (white).

Figura 58. Ventana de acceso de la interfaz



A screenshot of the same login dialog window, but with an error message displayed. A smaller dialog box is overlaid on top, titled "Dialog", containing a yellow warning icon and the text "Usuario o contraseña incorrectos". Below this message is an "OK" button. In the background, the login fields are visible, with "alumno" in the "Usuario:" field and "12" in the "Contraseña:" field. The "Acceder" and "Salir" buttons are also visible at the bottom.

Figura 59. Ventana emergente de la interfaz

En la ventana de operación el usuario puede variar tanto la velocidad de movimiento del robot sobre la superficie, como la velocidad de movimiento de los brazos. Tenemos además las opciones para desplegar una ventana de visualización del entorno y para iniciar la operación del robot (ver Figura 60).



Figura 60. Ventana de operación del usuario

Al hacer clic en el botón de ayuda en la ventana de operación, se abre una ventana en la cual podemos visualizar información importante acerca de la utilización de la interfaz para el control del robot (ver Figura 61).

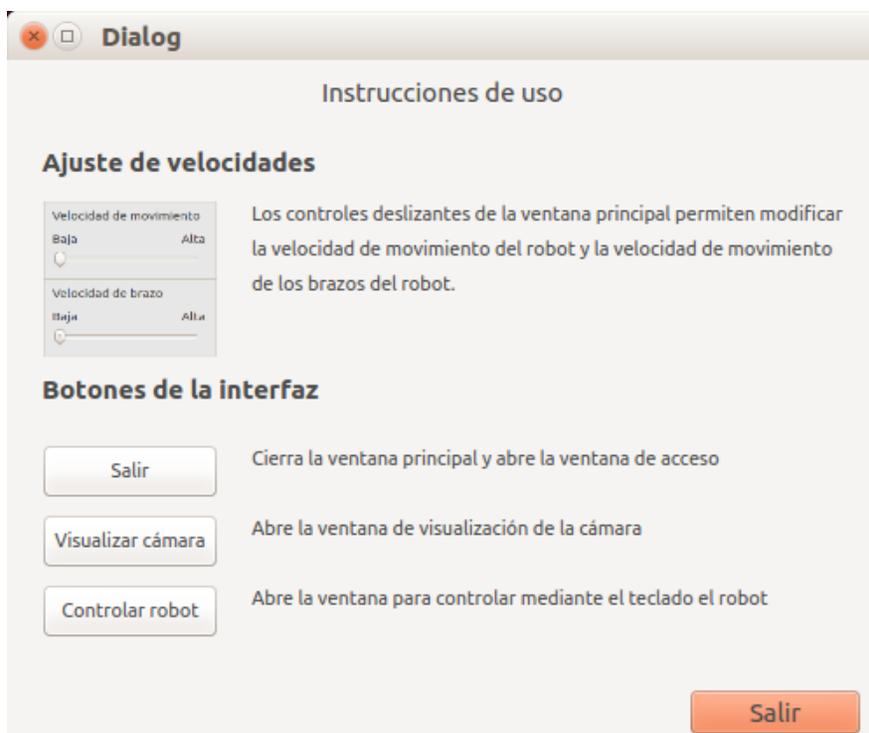


Figura 61. Ventana de ayuda de la interfaz

Al seleccionar la opción visualizar cámara de la ventana de operación se abre una ventana que permite visualizar el entorno frente al robot (ver Figura 62).

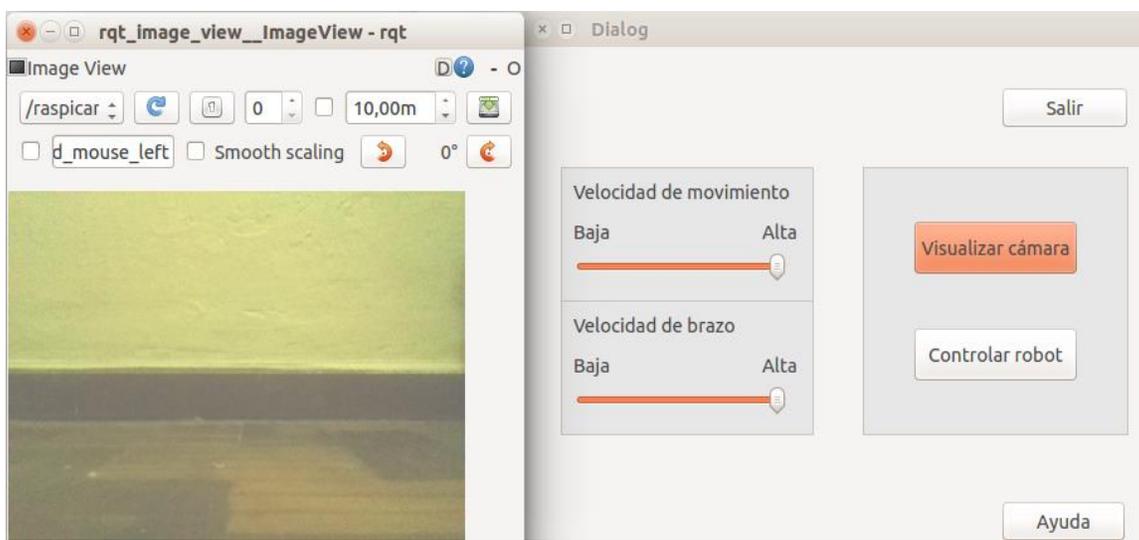


Figura 62. Ventana de visualización del entorno del robot

Al hacer clic en el botón controlar robot se accede a la ventana de control (ver Figura 63), únicamente mientras esta ventana se encuentre abierta se puede controlar el movimiento del robot mediante las flechas y los botones *avpág* y *fin* del teclado. Al cerrar esta ventana se desactiva el control del robot mediante el teclado y se regresa a la ventana de operación.



Figura 63. Ventana de control

Haciendo clic en el botón salir de la ventana de operación se regresa a la ventana de acceso, una ventana de confirmación aparecerá para asegurar que se desea salir de la operación del robot (ver Figura 64). En caso de salir y desear volver a ingresar a la ventana de operación se deberá ingresar nuevamente el usuario y la contraseña.

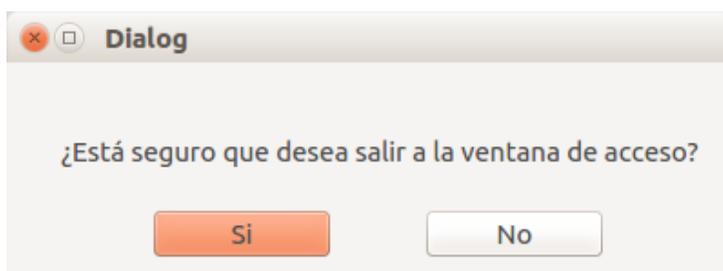


Figura 64. Ventana de confirmación de salida

3.5. Módulo 4. Tele-operación

El robot puede ser controlado de forma remota mediante el uso del mando configurado en la PC a través de la interfaz, para lograr esto es necesario mantener en constante comunicación el robot con la PC.

3.5.1. Subsistema 1. Comunicación

La comunicación entre el robot y el computador de operación debe ser inalámbrica debido a que el robot será controlado en zonas remotas, dicha comunicación es mediante Wi-Fi pues la tarjeta de control Raspberry Pi 3 permite este tipo de conexión sin necesidad de un módulo externo.

3.5.2. Subsistema 2. Mando

El control del movimiento del robot es a través del teclado, para lo cual se creó un nodo de ROS que permite la lectura de las teclas pulsadas, a su vez esta información es filtrada para utilizar solo los datos necesarios y en el momento adecuado.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo detalla la implementación o integración de los sistemas desarrollados en el tercer capítulo. Se realiza el maquinado de cada uno de los componentes del vehículo terrestre no tripulado, la comunicación entre el operador, interfaz gráfica y el robot, así como la configuración de los actuadores, permitiendo llegar al ensamblaje total de la estructura con una correcta funcionalidad.

4.1. Implementación de componentes mecánicos

Antes de proceder a la manufactura de cada uno de los componentes del robot se realizó el diseño asistido por computador de los mismos.

Se inició con el diseño del chasis del robot en la cual están montados todos los componentes electrónicos, tomando en cuenta los puntos de sujeción de cada uno de los motores, baterías, tarjeta de control, drivers, cámara y cableado.

Posteriormente se realizó el diseño del eje central, engranajes, ruedas, brazos y demás elementos necesarios para el ensamble, se verificó que exista espacio para todos los componentes internos y que al manufacturar encajen correctamente. El diagrama de flujo de la implementación del robot se muestra a continuación (ver Figura 65):

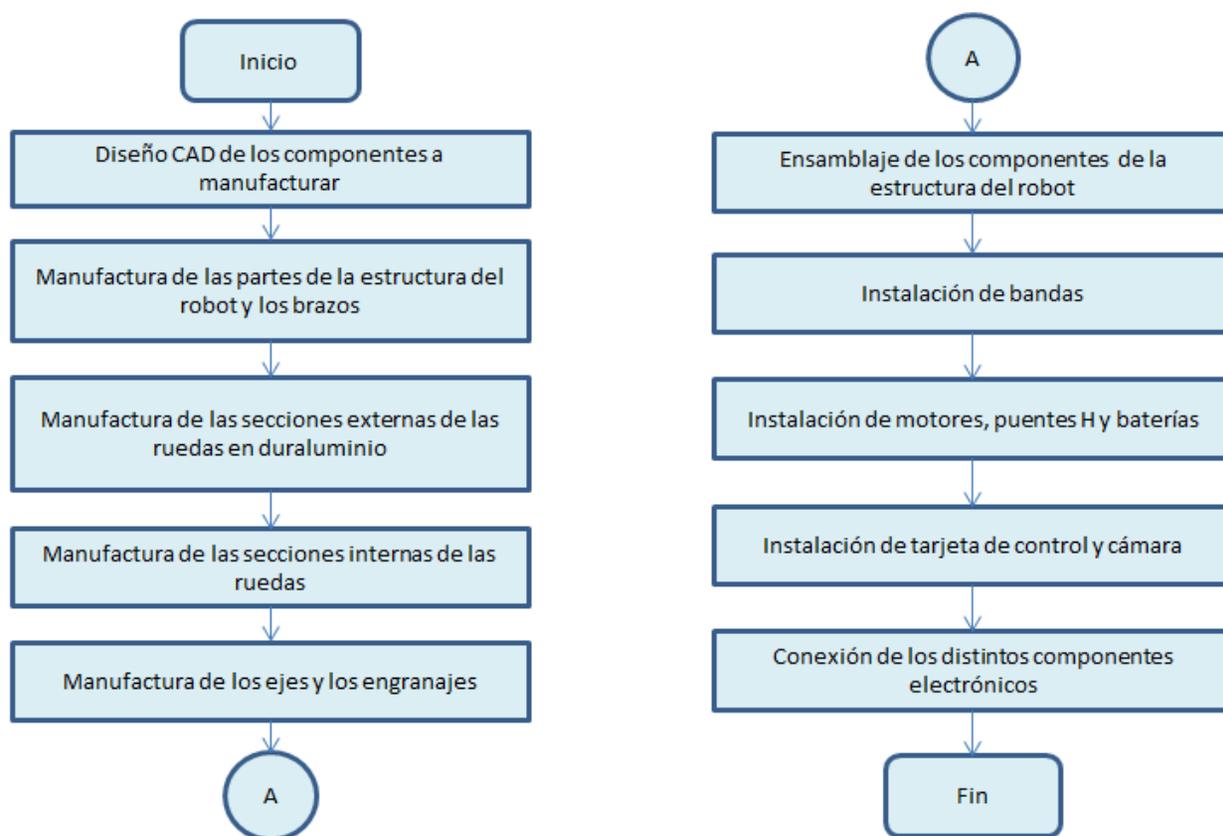


Figura 65. Diagrama de flujo de la implementación del robot

De acuerdo a su función y características requeridas los componentes fueron fabricados mediante distintos procesos de manufactura como torneado, taladrado, fresado, corte láser, etc.

4.1.1. Construcción de componentes del chasis del robot y brazos

El chasis o estructura central, los brazos y diversos componentes internos están fabricados en lámina de aluminio de 3 mm de espesor. Para la fabricación de estos componentes se utilizaron procesos de corte, limado, doblado y taladrado.

En la Figura 66 se muestra la estructura central y los brazos después del proceso de cortado y doblado.

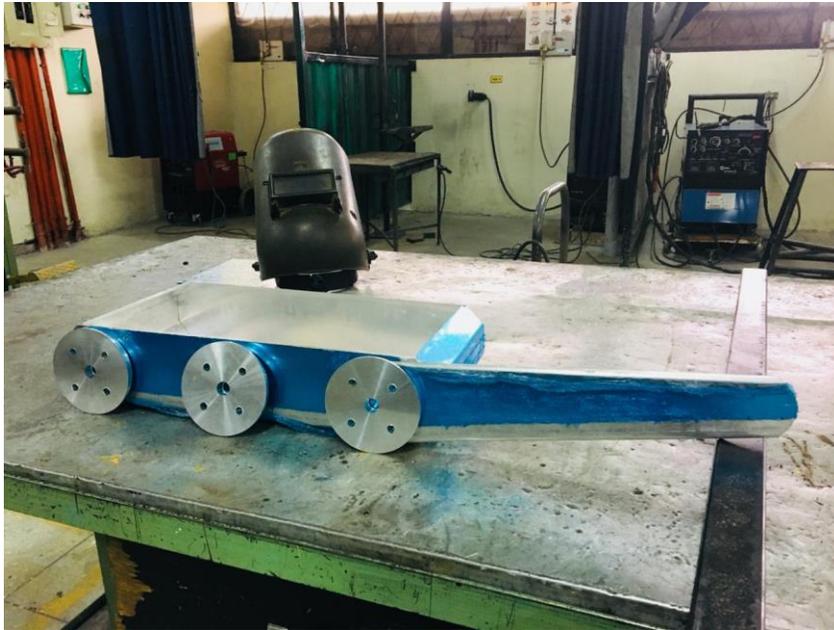


Figura 66. Chasis y brazos del robot

Las dimensiones totales de la estructura central son 441,4 x 210 x 90 mm, tanto el chasis como los brazos deben ser firmes y resistentes pues constituyen el soporte de todos los componentes del robot, es por esto que posterior a su corte y doblado se realizaron procesos de soldadura; además para poder colocar cada uno de los componentes del robot se realizaron operaciones de taladrado y limado (ver Figura 67). El resultado final de la estructura central y de los brazos al finalizar el proceso de manufactura se muestra en la Figura 68 y la Figura 69.



Figura 67. Proceso de soldadura y taladrado en el chasis y brazos



Figura 68. Chasis del robot



Figura 69. Brazos del robot

Para la estructura del robot se construyeron múltiples acoples necesarios para ensamblar los motores, ejes y demás componentes. Estos acoples fueron fabricados mediante procesos de corte, taladrado y limado (ver Figura 70).

Es necesario un acople por cada motor trasero, además se necesitan 6 acoples soldados en grupos de 3 para colocar los rodamientos que sostendrán el eje de los brazos.

Dos bases se construyeron para soportar los puentes H y la cámara en una posición fija y dos más para sujetar la tapa una vez esté completamente ensamblado el robot, todos los componentes fabricados en lámina de aluminio se muestran en la Figura 71.



Figura 70. Proceso de taladrado de acoples



Figura 71. Componentes fabricados en lámina de aluminio de 3 mm

Una vez finalizado el proceso de fabricación de todos los componentes en lámina de aluminio se procedió a realizar el pintado de las mismas (ver Figura 72).



Figura 72. Proceso de pintado

4.1.2. Construcción de las ruedas

Las cuatro ruedas de la estructura central del robot están compuestas de partes fabricadas en duraluminio mediante procesos de torneado, taladrado y roscado (ver Figura 73), y partes fabricadas en MDF por medio de corte láser. El resultado del ensamble de los componentes de la ruedas se muestra en la Figura 74. Las ruedas del extremo del brazos no son dentadas y están fabricadas en duraron a fin de reducir su peso (ver Figura 75).



Figura 73. Torneado de ruedas



Figura 74. Rueda de robot



Figura 75. Rueda montada en eje del brazo del robot

4.1.3. Construcción de ejes

El robot consta de un eje central que transmite el movimiento a los brazos y sostiene dos ruedas, además de dos ejes en los brazos que sostienen una rueda no dentada cada uno. Los ejes y los tornillos de los ejes de los brazos están fabricados en acero A36 (ver Figura 76).



Figura 76. Eje de los brazos y tornillo de sujeción

4.1.4. Construcción de engranajes

Los dos engranajes fueron fabricados en duraluminio mediante procesos de torneado, taladrado y fresado (ver Figura 77), los engranajes tienen 20 dientes fabricados con módulo 2 (ver Figura 78).



Figura 77. Proceso de torneado de cilindros para engranajes



Figura 78. Engranajes fabricados

En la caja reductora de los motores para su sujeción al chasis, en los ejes de los brazos así como en las perforaciones para prisioneros, fue necesario realizar un roscado interno con machuelo (ver Figura 79). En el caso de los ejes se realizó roscado externo con tarraja.



Figura 79. Proceso de roscado interno

4.2. Proceso de ensamblaje

Para el proceso de ensamblaje se adquirió tornillos, tuercas, rodamientos, arandelas y anillos de sujeción.

El primer proceso de ensamble fue la ubicación del eje de los brazos dentro del chasis. Para hacerlo fue necesario colocar el engranaje del eje en posición junto a su anillo de sujeción y

se colocó los acoples soldados con su respectivo rodamiento a cada lado del chasis del robot (ver Figura 80).

Una vez colocado el eje de los brazos se procede a ubicar el motor delantero en su posición y los dos motores traseros con sus respectivos acoples.

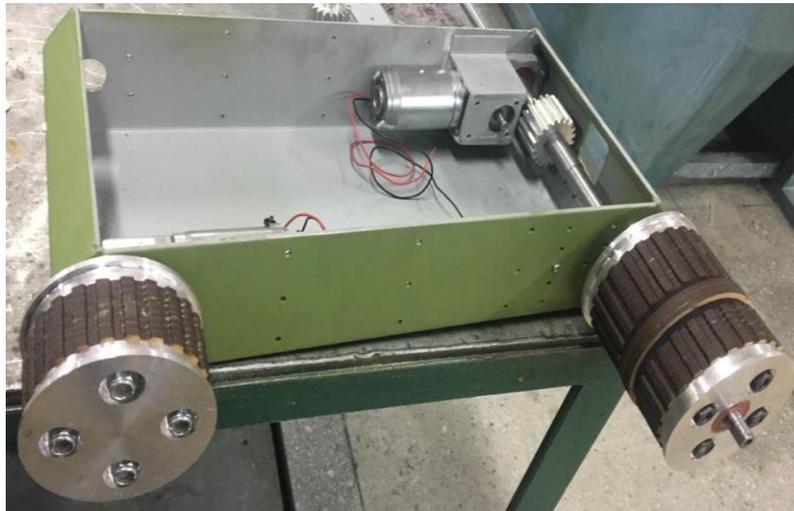


Figura 80. Ensamblaje del eje y colocación de motores

A continuación se colocan las guías en el chasis del robot y en los brazos (ver Figura 81). La función de las guías es únicamente mantener la tensión en las orugas en caso de que el robot este subiendo gradas.



Figura 81. Guías laterales de la estructura y brazos del robot

Se ubica las ruedas traseras y delanteras en el chasis del robot y las ruedas de los brazos en conjunto con las orugas (ver Figura 82).

Se realizan los ajustes necesarios en los extremos de los ejes y se colocan los prisioneros en las ruedas traseras y en el engranaje del motor delantero.



Figura 82. Proceso de ensamblaje de ruedas, bandas y engranaje

4.3. Implementación de componentes eléctricos y electrónicos

Se instala los tres puentes H en el chasis construido y se los fija a la base. Se ubica las baterías en su posición y por último se colocan las bases que permitirán asegurar la tapa del chasis (ver Figura 83).

A continuación se conectan de los drivers hacia las baterías y los motores.

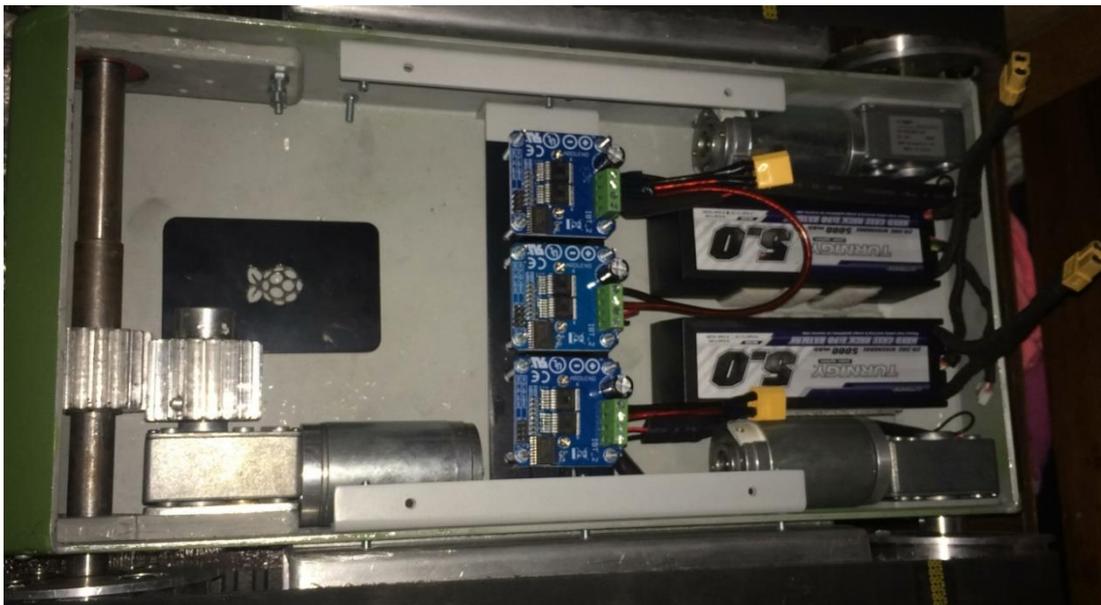


Figura 83. Instalación de componentes eléctricos y electrónicos

Posteriormente se instala la cámara y la tarjeta de control en su posición, se realizan las conexiones de la tarjeta con la cámara y con los puentes H (ver Figura 84), y la conexión de la tarjeta de control con una batería independiente.

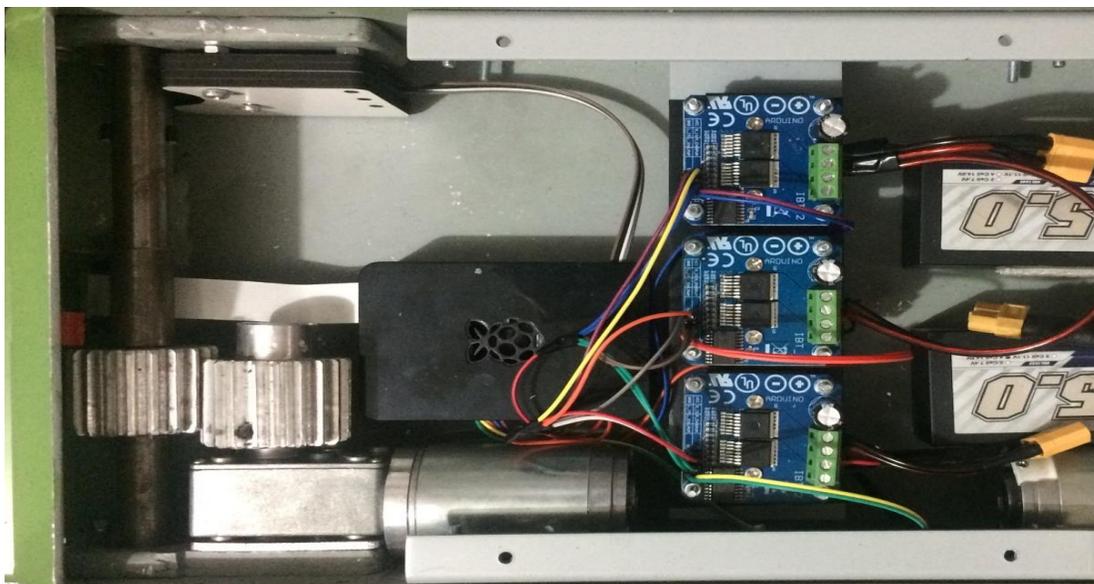


Figura 84. Instalación de tarjeta de control, cámara y cableado

4.4. Modelo final

El robot implementado resultado de todas las etapas de diseño se observa en la Figura 85. Con los brazos extendidos tiene 78 cm de longitud, 50.2 cm de ancho y 10 cm de altura.

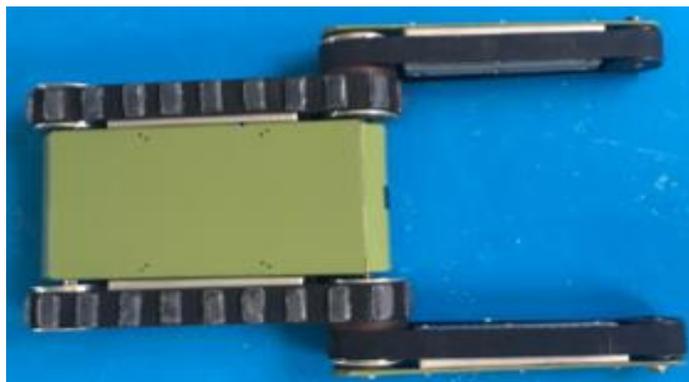


Figura 85. Modelo final del robot

Las características técnicas del modelo se detallan en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

Tabla 31

Características técnicas del modelo final del robot

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	DESCRIPCIÓN
Tarjeta de control	Raspberry Pi 3 modelo B
Programación	Software de código abierto
Material de la estructura	Aluminio, duraluminio y MDF
Comunicación	Wi-Fi
Fuentes de alimentación	2 baterías Turnigy 5000mAh 4S 25C Lipo Pack con XT-90 Cargador portátil Sony CP-V10A/WC
Motores	3 motores TSINY TS-40 GZ868-505
Autonomía en uso continuo	2 horas

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo detalla las pruebas realizadas con los componentes de cada subsistema trabajando de manera simultánea en diversos terrenos.

5.1. Métricas de evaluación

No existe un parámetro único que indique la calidad del sistema. Para realizar la evaluación del desempeño del robot se seleccionaron distintas métricas las cuales evalúan diferentes aspectos del sistema, estas métricas brindan una visión general del funcionamiento de los componentes del robot por separado.

5.1.1. Funcionamiento de motores

Es la inspección de las características de los motores tanto en movimiento como en estado estático que indican que el motor está funcionando correctamente, para lo cual se seleccionaron varios aspectos que fueron verificados y evaluados según lo observado durante las pruebas de funcionamiento.

5.1.2. Capacidad de comunicación

Consiste en la evaluación de la conexión entre el controlador del robot y el computador, en este punto se evaluó la distancia máxima en la cual se mantuvo la comunicación y la velocidad de envío y recepción de los datos.

5.1.3. Autonomía energética

Indica el tiempo máximo que el robot puede estar en funcionamiento de forma continua.

5.1.4. Velocidad de movimiento

Indica la velocidad de desplazamiento del robot en distintas condiciones como en tipos de terreno e inclinación del mismo. La velocidad en cada caso se obtiene midiendo el tiempo que le toma al robot desplazarse una distancia determinada.

5.2. Diseño del experimento

La HMI y la programación se realizó en un computador PC Notebook HP Pavilion 15-e045sa con procesador INTEL core i7.

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en espacios cerrados y al aire libre, en un clima soleado con temperatura promedio de 20°C y con humedad promedio de 62% (The Weather Channel, 2018).

Las pruebas se realizaron en varios terrenos los cuales se detallan a continuación:

- Terreno liso de hormigón: sin presencia de agua de textura dura y áspera que favorece la adherencia del robot al terreno
- Terreno con césped: húmedo de forma irregular con presencia de césped de textura suave y lisa que desfavorece a la adherencia del robot al terreno.
- Terreno mixto: formado de arena, césped y piedras de tamaño pequeño de distintos tipos de textura, la adherencia al terreno es buena o mala en distintos tramos del terreno.
- Gradas: de hormigón de textura dura y áspera, o baldosa de textura dura y lisa, ambos ofrecen buena adherencia entre el robot y el terreno.

5.3. Resultados

5.3.1. Pruebas de motores

Se realizaron pruebas de funcionamiento de los motores antes y después del ensamblaje para verificar la correcta operación en conjunto con el resto de componentes. Posteriormente se verificó el funcionamiento de los motores en condiciones normales del robot, en la Tabla 32 se

muestran una lista de parámetros analizados para los motores y los resultados obtenidos en cada parámetro.

Tabla 32
Parámetros y resultados de pruebas en motores

PARÁMETRO	RESULTADO		
	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Conexiones	Correcto	Correcto	Correcto
Voltaje de operación	Correcto	Correcto	Correcto
Correcto ensamblaje	Si, firme	Si, firme	Si, firme
Correcta alineación	Si, centrado	Si, centrado	Si, centrado
Encendido de motor	Correcto	Correcto	Correcto
Funcionamiento continuo	Correcto	Correcto	Correcto
Velocidad de movimiento sentido horario	Correcto	Correcto	Correcto
Velocidad de movimiento sentido anti horario	Correcto	Correcto	Correcto
Sonidos extraños	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Sobrecalentamiento	No	No	No
Vibraciones	Normales	Normales	Normales

5.3.2. Pruebas de comunicación PC-Robot

En la Tabla 33 se muestran los resultados de las pruebas realizadas a la conexión entre el PC y el robot a una distancia máxima de 60 m.

Tabla 33
Parámetros y resultados de pruebas en conexión PC-Robot

PARÁMETRO	RESULTADO
Conexión entre tarjeta de control y pc	Correcto, estable y rápido
Envío de datos	Correcto
Recepción de datos	Correcto
Respuesta en caso de desconexión	Correcto

CONTINÚA



Se genera cola de instrucciones	No
Recepción de imagen en HMI	Adecuada
Velocidad de respuesta a instrucciones	Adecuada

En la Tabla 34 se muestran los resultados de las pruebas realizadas para medir el alcance máximo en el cual el robot se comporta de forma adecuada respondiendo instantáneamente a las instrucciones enviadas desde el computador.

Tabla 34

Prueba de alcance máximo

NÚMERO DE PRUEBA	DISTANCIA MÁXIMA EN METROS
1	62
2	68
3	65
4	75
5	72
6	69
Promedio	68,5

5.3.3. Pruebas de duración de baterías

Las baterías fueron seleccionadas con el objetivo de tener una duración mínima de dos horas de funcionamiento continuo, dependiendo de las condiciones de terreno este tiempo puede variar. En la Tabla 35 se muestran los resultados de distintas pruebas de duración de las tres baterías.

Tabla 35*Parámetros y resultados de pruebas de duración de baterías*

PARÁMETRO	RESULTADO
Duración batería Sony	157 min
Duración batería Turnigy (conexión dos motores)	122 min
Duración batería Turnigy (conexión un motor)	263 min

5.3.4. Pruebas de funcionamiento en distintos terrenos

5.3.4.1. Pruebas en terreno de hormigón

Se realizaron pruebas de movimiento en distintos terrenos mostrando un mejor desempeño en el terreno de hormigón (ver Figura 86). En este tipo de terreno no es necesario el uso de los brazos del robot, únicamente se realiza el movimiento de traslación y rotación mediante el movimiento de las orugas.



Figura 86. Desplazamiento del robot en terreno horizontal liso

5.3.4.2. Pruebas en terreno con césped

El segundo terreno es césped (ver Figura 87). En este terreno el robot tuvo problemas en inclinaciones superiores a 25 grados pues las orugas no generaron la tracción necesaria para que el robot no resbale, en inclinaciones inferiores a 25 grados el robot se desplazó con normalidad.



Figura 87. Desplazamiento del robot en césped

5.3.4.3. Pruebas en terreno mixto

El tercer terreno de prueba fue uno que cuenta con césped, tierra y rocas (ver Figura 88). En este terreno el robot redujo levemente su velocidad de movimiento y de rotación, sin embargo el resultado fue satisfactorio pues se desplazó y rotó con normalidad.



Figura 88. Desplazamiento del robot en terreno mixto

5.3.4.4. Pruebas en gradas

Por último se realizó la prueba en gradas (ver Figura 89), en este caso si es necesario el uso de los brazos del robot para posicionar el robot sobre las gradas, el control del robot en este terreno es ligeramente más complejo pues ocasionalmente es necesario corregir la trayectoria del robot o la posición de los brazos, sin embargo el resultado fue completamente satisfactorio pues el robot subió las gradas con facilidad.



Figura 89. Desplazamiento del robot en gradas

5.3.5. Pruebas de velocidad de movimiento

Se realizaron pruebas en diferentes terrenos para verificar la velocidad de movimiento del robot, en un recorrido de 200 cm se obtuvieron los resultados mostrados a continuación:

5.3.5.1. Pruebas de velocidad en terreno de hormigón

Debido a que el terreno ofrece una rugosidad suficiente para lograr una buena adherencia del robot la velocidad de desplazamiento no varía mucho aun cuando se altera el ángulo del terreno con respecto al plano horizontal, sin embargo para mover el robot el ángulo máximo de inclinación sería 42° pues el torque de los motores fue calculado con esta inclinación.

Tabla 36

Pruebas de velocidad en terreno de hormigón

TERRENO DE HORMIGÓN

Número de prueba	Inclinación		
	0°	10°	30°
1	22,5 s	22,61 s	22,57 s
2	22,54 s	22,55 s	22,56 s
3	22,62 s	22,55 s	22,62 s
4	22,52 s	22,57 s	22,58 s
Promedio	22,55 s	22,57 s	22,58 s

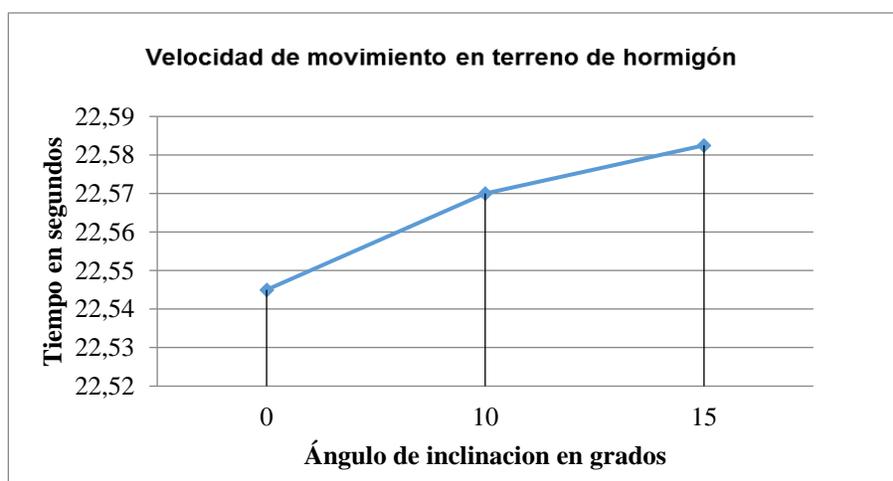


Figura 90. Velocidad de movimiento en terreno de hormigón

5.3.5.2 Pruebas de velocidad en terreno con césped

En este terreno el robot tuvo una velocidad de desplazamiento menor debido a que las orugas patinaban sobre el terreno. Al superar la inclinación de 25° en este terreno y debido principalmente a su humedad el robot desliza sobre el terreno sin avanzar.

Tabla 37

Pruebas de velocidad en terreno con césped

Número de prueba	Inclinación		
	0°	20°	25°
1	23,55 s	25,21 s	25,68 s
2	23,45 s	24,98 s	25,87 s
3	23,56 s	24,24 s	26,12 s
4	23,55 s	25,67 s	26,32 s
Promedio	23,53 s	25,03 s	26,00 s

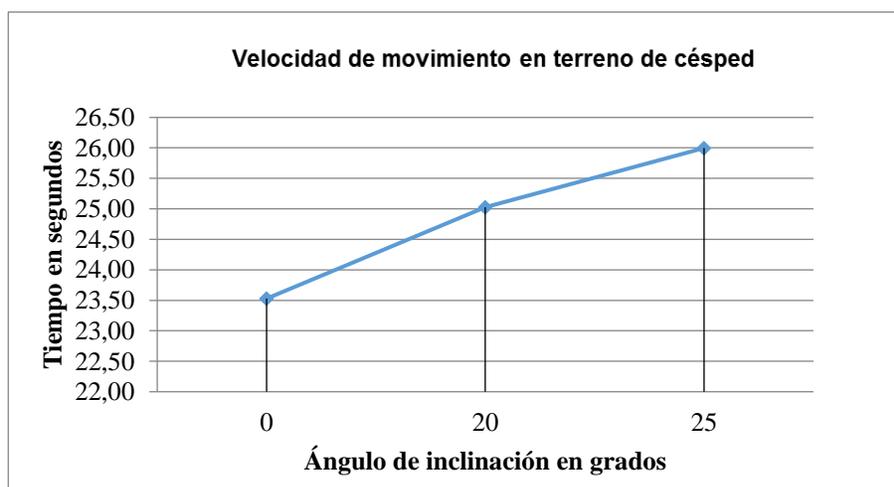


Figura 91. Velocidad de movimiento en terreno de césped

5.3.5.3. Pruebas de velocidad en terreno mixto

La velocidad en este terreno varía levemente dependiendo de la inclinación y en todos los casos es menor a la velocidad sobre hormigón, esto se debe principalmente al deslizamiento del robot sobre este tipo de terreno.

Tabla 38

Pruebas de velocidad en terreno mixto

TERRENO MIXTO			
Número de prueba	Inclinación		
	0°	7°	11°
1	22,9 s	23,01 s	23,01 s
2	22,78 s	23,15 s	23,39 s
3	22,87 s	23,45 s	23,76 s
4	23,09 s	22,99 s	23,47 s
Promedio	22,91 s	23,15 s	23,41 s

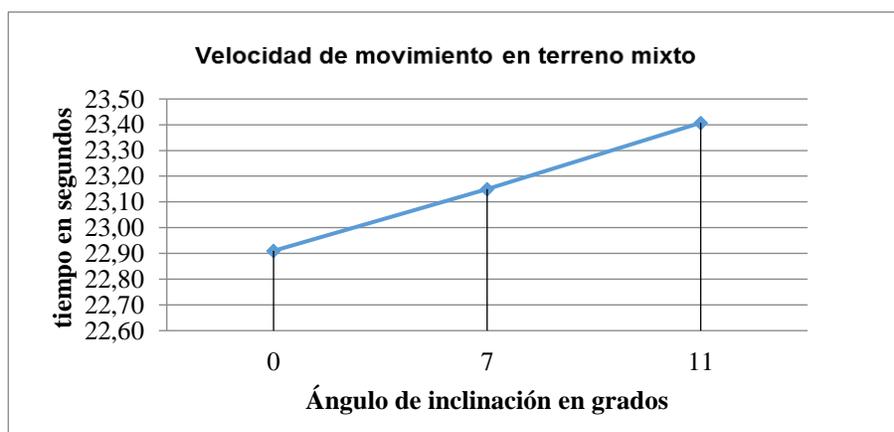


Figura 92. Velocidad de movimiento en terreno mixto

5.3.5.4 Pruebas de velocidad en gradas

En gradas la velocidad no varía significativamente con respecto a la inclinación pues el labrado de las orugas permite que el robot se apoye en los filos y avance con normalidad, sin embargo se producen deslizamientos ocasionales hasta que el labrado de la oruga tenga contacto con el filo de las gradas.

Tabla 39
Pruebas de velocidad en gradas

Número de prueba	GRADAS	
	Inclinación	
	15°	23°
1	24,47 s	25,87 s
2	24,59 s	25,67 s
3	24,01 s	25,31 s
4	25,34 s	26,13 s
Promedio	24,60 s	25,75 s

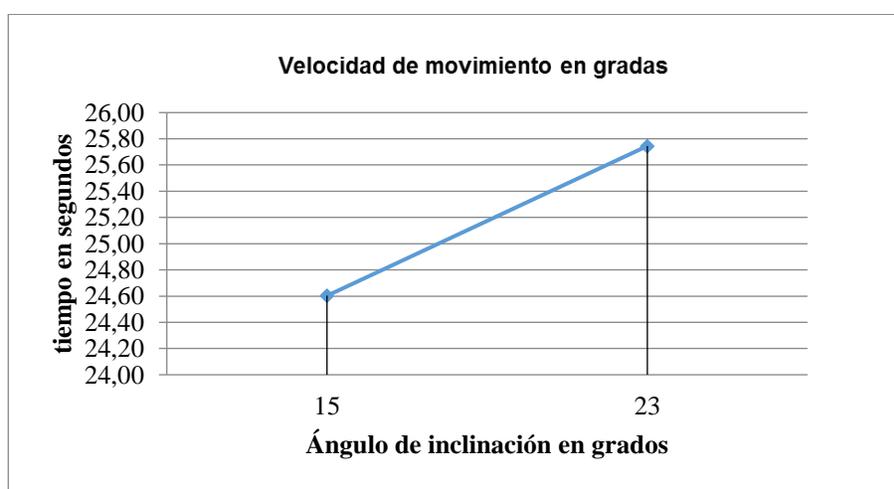


Figura 93. Velocidad de movimiento en gradas

5.4. Discusión

El robot cumple con su objetivo de desplazarse por distintos tipos de terreno y principalmente el ascenso y descenso de gradas. El diseño robusto le permite desplazarse por todos estos terrenos sin sufrir daños en la estructura.

El diseño con dos brazos robóticos para el posicionamiento sobre las gradas funcionó correctamente y es altamente recomendado para este tipo de robots. Estos brazos robóticos ofrecen muchas ventajas a la hora de superar obstáculos dotando de versatilidad en movilidad al robot.

El robot puede funcionar al estar invertida su posición normal pues el diseño es el mismo tanto arriba como abajo. En caso de que el terreno o algún factor externo volteen el robot este puede seguir cumpliendo su función y seguir trabajando con normalidad.

El diseño de la estructura evita que la mayoría de agentes externos afecten a los componentes internos del robot, sin embargo el agua y polvo pueden ingresar fácilmente pues no cuenta con impermeabilización, es por esto que el robot no puede ser utilizado en condiciones de lluvia o terrenos como charcos o lodo.

El robot fue diseñado para desplazarse en terrenos con una inclinación máxima de 42 grados, a pesar de que la forma de la estructura permite incluir dispositivos adicionales como un brazo robótico no es recomendable pues esto afectaría negativamente en la resistencia de la estructura y el funcionamiento de los motores.

El labrado con el cual se dotó al robot genera una buena adherencia en terrenos como hormigón o baldosa sin embargo resulta insuficiente en el caso de césped húmedo pues el robot se resbala en inclinaciones superiores a 25°.

La conexión entre el robot y el computador fue adecuada durante las pruebas sin embargo las condiciones ambientales e incluso la estructura del robot influye en esta comunicación principalmente en la fluidez del video. En un ambiente caluroso la tarjeta de control del robot puede sobrecalentarse generando errores en la comunicación o incluso crasheos en el sistema operativo siendo necesario el reinicio completo de la tarjeta de control.

CONCLUSIONES

- Se construyó un prototipo de robot que cuenta con un diseño mecánico y construcción robusto, además posee un diseño electrónico fiable, una conexión remota y algoritmos de control programados que le ofrecen al operario una respuesta inmediata a las instrucciones enviadas, características que le permite al robot atravesar distintos terrenos incluido el ascenso y descenso de gradas.
- Se manufacturó las piezas del robot utilizando aluminio, duraluminio, acero y MDF, tomando en cuenta criterios de costo, peso y resistencia, con la finalidad de brindar al robot robustez a condiciones de uso exigentes en distintos terrenos, además de ser liviano y barato.
- Para solucionar el deslizamiento del robot sobre las superficies inclinadas o demasiado lisas, se dotó a las bandas del robot de franjas de silicona de 22 mm de ancho y 5 mm de alto que generan tracción en el suelo y ofrecen al robot puntos de apoyo en terrenos irregulares y en los filos de las gradas.
- Se diseñó e implementó dos brazos robóticos como solución al ascenso del robot sobre las gradas, los cuales se elevan y posicionan sobre las mismas permitiéndole avanzar sobre esta superficie.
- Se seleccionaron los motores TSINY TS-40 GZ868-505 pues cumplen con los requisitos de torque de 97,072 Kg cm para los brazos y 44,592 Kg cm para la estructura, valores resultantes que tiene un factor de seguridad de 1,6, necesario para los movimientos del

robot a través de distintos terrenos, además de poseer un precio bajo y ser de fácil adquisición. El control de estos motores mediante PWM es simple y confiable a la vez.

- Se seleccionó la tarjeta de control Raspberry Pi 3 modelo B que permite la conexión mediante Wi-Fi sin necesidad de ningún módulo adicional, además de ser una tarjeta versátil que se adapta a los requerimientos del usuario. En este proyecto se instaló el sistema operativo Lubuntu 16.04 Xenial en la tarjeta de control y para la programación se utilizó ROS y Python.
- Se implementó el circuito de control el cual involucra la tarjeta de control, los Puente H BTS 7960, las baterías y los motores, que permite la operación de los actuadores de acuerdo a la programación realizada en la tarjeta de control.
- Se utilizó dos baterías de polímero de litio debido a su gran capacidad de almacenamiento de energía de 5000 mAh a 14,8 V, las características de las baterías seleccionadas resultan adecuadas para su uso en la alimentación de los motores del robot.
- Se implementó una interfaz gráfica que permite el control del robot remotamente mediante el uso del teclado del computador. La interfaz permite la visualización del entorno frente al robot para facilitar al operario la conducción en lugares donde no tenga vista directa. Es posible regular la velocidad de desplazamiento del robot y la velocidad de movimiento de los brazos para un control más preciso y adecuado por parte del operario.
- Se comprobó el correcto funcionamiento del robot en distintos terrenos incluyendo el ascenso y descenso de gradas, evidenciando un excelente desempeño en cada uno de los

terrenos en que los que estuvo a prueba. El control por parte del operario a través de la interfaz y el teclado resultó sencillo y eficaz.

- Se realizaron pruebas de ascenso y descenso en gradas con distintas inclinaciones comprendidas entre 42 y 26 grados correspondientes a valores comunes de inclinaciones en gradas, el resultado de las pruebas fue satisfactorio pues el robot se desplazó con normalidad, visualizando una leve reducción en la velocidad de avance y un leve control del operario para corregir la dirección del robot en caso de que este tendiera a desviarse de la ruta.

RECOMENDACIONES

- Para un futuro trabajo de investigación relacionado con este robot se puede diseñar y construir una versión con el mismo sistema de movilidad, pero con una estructura que posea cuatro brazos robóticos, con la finalidad de determinar las ventajas y desventajas respecto de la versión de dos brazos.
- Analizar la factibilidad de reemplazar el material utilizado en la construcción del chasis, ruedas y brazos del robot por plásticos, reforzando con metales como acero o aluminio solo en puntos de máximo esfuerzo, esto con el fin de reducir el peso del robot.
- Realizar un diseño hermético del robot para evitar el ingreso de agua o polvo al interior del chasis, con el objetivo de impedir que los componentes electrónicos se dañen, esto mejoraría las capacidades todo terreno del robot.
- Implementar un sistema de visión artificial para la detección de objetos, y desarrollar algoritmos automatizados de elusión de obstáculos que faciliten el uso del robot y permitan obtener un vehículo terrestre no tripulado autónomo, con la finalidad de incrementar el campo de aplicación del mismo.
- Desarrollar un mando con D-Pad y un algoritmo adecuado de manera que el operario pueda controlar el movimiento del robot de forma más precisa y sencilla.
- Implementar el uso de sensores y algoritmos que verifiquen el estado del sistema como la carga de las baterías, la posición e inclinación del robot, estado de la conexión, entre

otros, proporcionando al operario una visión completa del robot que le permita tomar mejores decisiones durante la operación del robot.

- Implementar un algoritmo de estabilización de la imagen captada por el robot, con la finalidad de que no sean notorias para el operario las vibraciones generadas por el desplazamiento del robot sobre superficies irregulares.

BIBLIOGRAFÍA

- 21st Century Book. (2001). *Twenty-first Century Books*. Retrieved Septiembre 17, 2018, from <http://www.tfcbooks.com/patents/0613809.htm>
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, *1*, 1-13.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles. *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. Barcelona, Spain.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2016). Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles. *Neural Processing Letters*, *43*(2), 459-477.
- Aguilar, W. G., & Morales, S. (2016). 3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms. *Electronics*, *5*(4), 70.
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Costa-Castello, R. (2017). Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 287-297).
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Pardo, J. A. (2017). Motion intention optimization for multirotor robust video stabilization. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Aguilar, W. G., Casaliglla, V. P., & Pólit, J. L. (2017). Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles. *Electronics*, *6*(1), 10.
- Aguilar, W. G., Casaliglla, V. P., & Pólit, J. L. (2017). Obstacle Avoidance for Low-Cost UAVs. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.

- Aguilar, W. G., Casaliglla, V. P., Pólit, J. L., Abad, V., & Ruiz, H. (2017). Obstacle Avoidance for Flight Safety on Unmanned Aerial Vehicles. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 575-584).
- Aguilar, W. G., Cobeña, B., Rodriguez, G., Salcedo, V. S., & Collaguazo, B. (2018). SVM and RGB-D Sensor Based Gesture Recognition for UAV Control. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 713-719). Springer.
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Angulo, C. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers and Saliency Maps. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 563-574).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Lopez, W. (2017). Cascade Classifiers and Saliency Maps Based People Detection. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 501-510).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., Ruiz, H., & Parra, H. (2017). Real-Time Detection and Simulation of Abnormal Crowd Behavior. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 420-428).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Ruiz, H., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., & Parra, H. (2017). Statistical Abnormal Crowd Behavior Detection and Simulation for Real-Time Applications. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 671-682).
- Aguilar, W. G., Luna, M., Moya, J., Abad, V., Parra, H., & Ruiz, H. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers with Meanshift. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.

- Aguilar, W. G., Manosalvas, J. F., Guillén, J. A., & Collaguazo, B. (2018). Robust Motion Estimation Based on Multiple Monocular Camera for Indoor Autonomous Navigation of Micro Aerial Vehicle. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 547-561). Springer.
- Aguilar, W. G., Morales, S., Ruiz, H., & Abad, V. (2017). RRT* GL Based Optimal Path Planning for Real-Time Navigation of UAVs. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 585-595).
- Aguilar, W. G., Morales, S., Ruiz, H., & Abad, V. (2017). RRT* GL Based Path Planning for Virtual Aerial Navigation. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 176-184).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 298-308).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Real-Time 3D Modeling with a RGB-D Camera and On-Board Processing. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 410-419).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Visual SLAM with a RGB-D Camera on a Quadrotor UAV Using on-Board Processing. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 596-606).
- Aguilar, W. G., Salcedo, V. S., Sandoval, D. S., & Cobeña, B. (2017). Developing of a Video-Based Model for UAV Autonomous Navigation. In *Communications in Computer and Information Science* (pp. 94-105).

- Aguilera, M., & Bautista, M. (2007). Diseño y Control de Robots Móviles . *La Mecatrónica en México*.
- Amaguaña, F., Collaguazo, B., Tituaña, J., & Aguilar, W. G. (2018). Simulation System Based on Augmented Reality for Optimization of Training Tactics on Military Operations. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 394-403). Springer.
- Andrea, C. C., Byron, J. Q., Jorge, P. I., Inti, T. C., & Aguilar, W. G. (2018). Geolocation and Counting of People with Aerial Thermal Imaging for Rescue Purposes. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 171-182). Springer.
- Argudo, G., & Arpi, A. (2012, Julio). Diseño y construcción de un robot móvil tele-operado para la asistencia en operaciones de altorriesgo del cuerpo de bomberos. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Arias, M., & García, R. (2016, Octubre 24). Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para. Solano, Oaxaca, México.
- Army Technology. (n.d.). *iRobot 510 PackBot Multi-Mission Robot*. Retrieved Septiembre 12, 2018, from sitio web de Army Technology: <https://www.army-technology.com/projects/irobot-510-packbot-multi-mission-robot/>
- Arqhys. (2012, Diciembre). *Revista Arqhys*. Retrieved from <https://www.arqhys.com/articulos/robot-hexapodo.html>
- Bambino, I. (2008). Una introducción a los robots móviles. In I. Bambino. Buenos Aires: AADECA.

- Basantes, J., Godoy, L., Carvajal, T., Castro, R., Toulkeridis, T., Fuertes, W., . . . Addison, A. (2018). Capture and processing of geospatial data with laser scanner system for 3D modeling and virtual reality of Amazonian Caves. *IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. Samborondón, Ecuador.
- Brown, R. (2017, Septiembre 7). The Telegraph. Retrieved from <https://www.telegraph.co.uk/news/2017/09/07/bae-systems-unveil-robot-stretcher-designed-evacuate-wounded/>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Cerón, A. (2005). Sistemas robóticos teleoperados. *Publicación mensual Red de Revistas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 62-69. Retrieved Septiembre 17, 2018
- Charron, N. (2017, Julio 7). *Clearpath Robotics*. Retrieved from <https://www.clearpathrobotics.com/2017/07/rapid-outdoorindoor-3d-mapping-husky-ugv/>
- Delgado, V. (2016). *ELDRONE*. Retrieved Septiembre 16, 2018, from <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>
- Direct Industry. (n.d.). *HiBot*. Retrieved from <http://www.directindustry.es/prod/hibot/product-177237-1923367.html>
- Eleve. (2011). Retrieved from <https://www.eleveescaleras.com.ar/clasificacion-de-escaleras.htm>
- Embention. (2016, Enero 15). *Embention*. Retrieved Septiembre 17, 2018, from <https://www.embention.com/es/news/ugv-aplicaciones-funciones-profesionales/>
- Fields, L. (2013). Comparación de sistemas de comunicación inalámbrica para robots móviles. *Prisma Tecnológico*.

- Gerens. (2018, Enero 24). *Gerens*. Retrieved from <https://gerens.pe/blog/creacion-valor-industria-minera/>
- iRobot. (2018). *PackBot el robot portátil multimisión*. Retrieved from <http://www.endeavorrobotics.com/media/docs/Spanish/Endeavor%20Robotics%20510%20PackBot%20Spec%20Sheet%20SPANISH.pdf>
- James, M. (2014, Diciembre 2). C net. *Los Kiva trabajando*.
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Mesías, R., Araujo-Villaroel, B., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). Interface of Optimal Electro-Optical/Infrared for Unmanned Aerial Vehicles. In *Smart Innovation, Systems and Technologies* (pp. 372-380).
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Tozer, T., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). E-services from Emergency Communication Network: Aerial Platform Evaluation. *International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)* (pp. 251-256). IEEE.
- López, E., & Isorna, F. (2014, Noviembre). II Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. *Aplicación en vehículos no tripulados de sistemas híbridos de potencia basados en pilas de combustible*. Zaragoza, España.
- Nasa. (n.d.). *Nasa Mars Exploration*. Retrieved from <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/present/2003/>
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., León, G., & Jara-Olmedo, A. (2017). Math Model of UAV Multi Rotor Prototype with Fixed Wing Aerodynamic Structure for a Flight Simulator. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 199-211).

- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., Reyes, R. P., & Montoya, L. (2017). Vertical take off and landing with fixed rotor. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Pardo, J. A., Aguilar, W. G., & Toulkeridis, T. (2017). Wireless communication system for the transmission of thermal images from a UAV. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Ponsa, P., Díaz, M., & Catalá, A. (n.d.). Creación de guía ergonómica para el diseño de interfaz de supervisión. *La interacción persona - ordenador*.
- Quezada, D. (2014, Abril 21). Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema Rocker-Bogie y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Sangloquí, Pichincha, Ecuador.
- Rambal - Automatización y robótica. (n.d.). Retrieved from <http://rambal.com/control-motores/931-driver-puente-h-bts7960.html>
- Raspberry Pi. (n.d.). *Raspberry Pi*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- Riola, J. (2014). La situación actual de las tecnologías de doble uso. *Cuadernos de estrategia 183, Cap 4*. Ministerio de Defensa: Instituto Español de Estudios Estratégicos.
- Salgado, M. F., Tierra, A., & Aguilar, W. G. (2017). Travel Planning in Public Transport Networks Applying the Algorithm A* for Metropolitan District of Quito. *Analysis, 4*, 11.

- Salgado, M. F., Tierra, A., Sandoval, D. S., & Aguilar, W. G. (2017). Travel Time Estimation of Public Transport Networks Based on Commercial Incidence Areas in Quito Historic Center. *Analysis*, 294, 78448.
- Seyfi, L., & Akbulut, I. (2014, Noviembre). Implementation of unmaned ground vehicle with a smartphone. *International Journal of Computer Science and Mobile Applications*, 01-10.
- Sony. (2018). Retrieved from <https://www.sony.es/electronics/cargador-portatil/cp-v10a>
- The Weather Channel. (2018, Noviembre 5). Retrieved from <https://weather.com/es-EC/tiempo/hoy/1/ECXX0008:1:EC>
- Tilves, M. (2012, Marzo 20). Silicon. Retrieved from <https://www.silicon.es/amazon-invierte-775-millones-de-dolares-en-una-empresa-de-robots-20973>
- TSINY Micro motion solutions. (2009). *Worm gear motors*. Retrieved from http://www.tsinymotor.com/Products/Worm%20Gear%20Motors/list_10_2.html
- Turnigy power systems. (n.d.). *Turnigy Lipoly*. Retrieved from <http://www.turnigy.com/batteries/turnigy-blue/>
- Ullero, A. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Barcelona: MARCOMBO.
- Underwood, J., & Burnett, C. (2017, Diciembre 14). *ACFR*. Retrieved from <http://confluence.acfr.usyd.edu.au/display/AGPub/Our+Robots>
- Yacuzzi, E., & Martín, F. (n.d.). QFD: Conceptos, Aplicaciones y nuevos desarrollos. 2003. Retrieved from <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/234.pdf>