



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

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

**TEMA: INVESTIGACIÓN DE LA MANIOBRABILIDAD DE UNA  
PLATAFORMA ROBÓTICA CON SISTEMA DE TRACCIÓN  
OMNIDIRECCIONAL E IMPLEMENTACIÓN EN EL PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL  
CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES  
MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO  
PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA**

**AUTORAS: JOHANNA ESTEFANÍA IZA IZA  
LAURA GABRIELA TACO POZO**

**DIRECTOR: ING. OSCAR ARTEAGA**

**LATACUNGA**

**2016**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“INVESTIGACIÓN DE LA MANIOBRABILIDAD DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA CON SISTEMA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL E IMPLEMENTACIÓN EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA”** realizado por las señoritas **Johanna Estefanía Iza Iza y Laura Gabriela Taco Pozo**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a las señoritas **Johanna Estefanía Iza Iza y Laura Gabriela Taco Pozo** para que lo sustenten públicamente.

**Latacunga, febrero del 2017**

Atentamente,



---

Ing. Oscar Arteaga  
**DIRECTOR**



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotras, **Johanna Estefanía Iza Iza** con cédula de identidad N° **0503796898** y **Laura Gabriela Taco Pozo**, con cédula de identidad N° **1804178190**, declaramos que este trabajo de titulación **“INVESTIGACIÓN DE LA MANIOBRABILIDAD DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA CON SISTEMA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL E IMPLEMENTACIÓN EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Latacunga, febrero del 2017**



Johanna Estefanía Iza Iza

C.C.: 0503796898



Laura Gabriela Taco Pozo

C.C.: 1804178190



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

**AUTORIZACIÓN**

Nosotras, **Johanna Estefanía Iza Iza** y **Laura Gabriela Taco Pozo**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“INVESTIGACIÓN DE LA MANIOBRABILIDAD DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA CON SISTEMA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL E IMPLEMENTACIÓN EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES” APROBADO POR EL CONSORCIO ECUATORIANO PARA EL DESARROLLO DE INTERNET AVANZADO – CEDIA”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

**Latacunga, febrero del 2017**

Johanna Estefanía Iza Iza

C.C.: 0503796898

Laura Gabriela Taco Pozo

C.C.: 1804178190

## DEDICATORIA

Este proyecto de titulación y toda mi carrera profesional se lo dedico a mi madre, que con sus consejos y ayuda incondicional, ha sido mi pilar en el que siempre me he apoyado. A mi padre que con su apoyo he logrado llegar a culminar una de mis metas. A mis hermanas por su afecto, apoyo y cariño que me ayudo a seguir y no desmayar. A mis amigos que hicieron más llevadera mi vida universitaria, en especial a Albita, por sus buenos consejos, ser mi apoyo. A mi sobrino Andres por llegar a mi vida y llenarla de luz, por su cariño, amor y todo el afecto que me da, que en esos momentos difíciles, con sus ocurrencias y ternura me alegra el día por mas gris que este sea.

**Joha**

Dedico todo el trabajo que he realizado y las largas horas de sacrificio a mis Papis, Santiago y Amada, porque supieron comprender los momentos en los que debí ausentarme por varias ocasiones, y por formarme para ser una persona que aunque tenga la oportunidad de seguir un camino equivocado, pudiera elegir siempre el correcto. A mi hermana Carito, que ha sido un ejemplo de que se puede ser una gran profesional y conservar la sencillez. A mis abuelitos, Pabito y Laurita, a quienes siempre recuerdo con cariño. A mi abuelita Mamusho, que siempre estuvo pendiente de mí y con cariño me ha recibido en su casa. A toda mi familia, por el apoyo y paciencia durante varios años. A mis amigos, por cada día preguntar cómo va mi tesis y no desistir en el intento de alegrar mi día con la misma pregunta. Y, por último, al Memi, mi pequeño hijo, que aunque hoy sólo tenga 3 años, cada día supo entender que viajara, y por las noches preguntara cómo me fue en la universidad; a él, en especial, porque a pesar de no compartir mucho tiempo, me ha sabido guiar para tomar decisiones que me alegran hoy.

**Gabby**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, y a mi familia esta meta alcanzada, que han sido incondicionales conmigo. A mis amigos por las palabras de aliento que siempre me brindaban, por estar ahí cuando más he necesitado una mano amiga. A mi amiga y compañera de tesis Gabby, durante el desarrollo de este proyecto hemos llegado a fortalecer nuestros lazos de amistad, entre risas, enojos, buenos y malos momentos, hemos llegado a alcanzar juntas esta meta ser Ingenieras Mecatrónicas, el haber empezado y culminado con bien esta tesis es muy gratificante, juntas hemos pasado muchísimos momentos inmemorables que siempre recordare con inmenso cariño. A nuestro tutor de tesis Ing. Oscar Arteaga, por ser nuestro guía en el desarrollo del proyecto. A Sr. Segundo Masapanta (Don Prome) por ayudarnos en la construcción de la plataforma. A Cesar, por ser un apoyo incondicional y desinteresado durante toda mi carrera universitaria y el desarrollo de este proyecto de grado. Y por último a todas esas personas que de forma directa e indirecta formaron parte de este proyecto.

**Joha**

Agradezco a mis padres, a mi hermana, a mi hijo Memi y a toda mi familia por las palabras de aliento y acciones generosas que me permitieron terminar una etapa maravillosa de mi vida. A mis amigos, quienes siempre han estado acompañándome cuando las cosas parecían ir mal; a Cesarín, por brindarnos una ayuda desinteresada en el desarrollo de esta tesis. A Christian, por el apoyo durante mi carrera. A mi tutor, Inge Arteaga, por toda la ayuda y los gratos momentos durante toda mi carrera. A nuestro querido Director de Carrera, Inge Hallo, por brindarnos las facilidades necesarias para culminar este trabajo. Al Inge Cochise, por ser una guía con sus consejos a lo largo de este proyecto. A mis maestros, quienes nos brindaron los conocimientos necesarios y valores para ser buenos profesionales. A Don Segundo, a quien con cariño lo llamamos Don Prome, por habernos ayudado durante todo en este tiempo y convertirse en un amigo. A mi compañera y amiga de tesis,

Joha, en quien encontré más de una razón para cada día divertirnos haciendo este trabajo, aún cuando parecía que la meta estaba lejos, y que hoy, lo vemos reflejado con tanta alegría en nuestro sacrificio. Y, finalmente, a esta hermosa carrera, que nos vio crecer, compartir, defender sus colores, y hoy, con nostalgia nos despide hacia un futuro prometedor, sin permitirnos olvidar de donde salimos.

**Gabby**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |             |
|---|-------------|
| <b>CARÁTULA</b> .....                               | <b>i</b>    |
| <b>CERTIFICACIÓN</b> .....                          | <b>ii</b>   |
| <b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....             | <b>iii</b>  |
| <b>AUTORIZACIÓN</b> .....                           | <b>iv</b>   |
| <b>DEDICATORIA</b> .....                            | <b>v</b>    |
| <b>AGRADECIMIENTO</b> .....                         | <b>vi</b>   |
| <b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....                   | <b>viii</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....                       | <b>xv</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                      | <b>xvi</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....                                | <b>xxi</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                               | <b>xxii</b> |
| <br>  |             |
| <b>CAPÍTULO I</b>                                   |             |
| <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1. Introducción.....                              | 1           |
| 1.1. Robots omnidireccionales .....                 | 2           |
| 1.2. Sistemas de Locomoción .....                   | 3           |
| 1.3. Tipos de ruedas .....                          | 3           |
| 1.3.1 Ruedas convencionales .....                   | 3           |
| 1.3.2 Ruedas suecas .....                           | 3           |
| 1.5. Sistemas de locomoción de robots móviles ..... | 4           |
| 1.3.3 Robots móviles con ruedas .....               | 5           |
| 1.5.2 Locomoción Diferencial .....                  | 6           |
| 1.5.3 Locomoción Síncrona.....                      | 6           |
| 1.5.4 Locomoción de Triciclo.....                   | 7           |



|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.5.5  | Locomoción Ackerman .....  | 9  |
| 1.5.6  | Locomoción Omnidireccional .....   | 10 |
| 1.5.7  | Locomoción por Cintas de Deslizamiento .....   | 12 |
| 1.5.8  | Locomoción por Patas.....  | 13 |
| 1.6.   | Estructura de un robot omnidireccional. ....   | 14 |
| 1.3.4  | Omnidireccional de 3 ruedas.....   | 14 |
| 1.6.1  | Omnidireccional de 4 ruedas.....   | 15 |
| a.     | Omnidireccional circular .....   | 15 |
| b.     | Omnidireccional con ruedas orientables .....   | 16 |
| c.     | Omnidireccional Mecanum.....   | 17 |
| 1.7.   | Investigación de la maniobrabilidad omnidireccional de una<br>plataforma robótica.....         | 17 |
| 1.8.   | Análisis de las ventajas y desventajas del uso de locomoción<br>omnidireccional .....          | 18 |
| 1.9.   | Cinemática del movimiento .....  | 22 |
| 1.9.1  | Propagación de velocidades .....   | 23 |
| 1.9.2  | Restricciones cinemáticas para la plataforma móvil<br>omnidireccional con ruedas mecanum ..... | 25 |
| 1.9.3  | Coordenadas generalizadas de configuración .....   | 28 |
| 1.10.  | Mecanismos del movimiento .....  | 29 |
| 1.10.1 | Mecanismos de transmisión lineal.....  | 30 |
| 1.10.2 | Mecanismo de transmisión circular .....  | 30 |
| a.     | Sistema de poleas con correas o bandas .....   | 31 |
| b.     | Sistema de engranes .....  | 33 |
| c.     | Sistema de cadenas.....  | 36 |
| 1.11.  | Análisis de las ventajas y desventajas del uso de sistemas de<br>transmisión por cadena .....  | 39 |

## CAPÍTULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>OMNIDIRECCIONAL.....</b> | <b>42</b>   |
| 2.1                         | Diseño mecánico de la plataforma omnidireccional ..... 42 |
| 2.2                         | Parámetros de diseño ..... 42                             |
| 2.2.1                       | Cargas de Diseño ..... 43                                 |
| a.                          | Factor de carga ..... 43                                  |
| b.                          | Comprobación para el peso de diseño..... 43               |
| c.                          | Fuerza de rozamiento estática y dinámica ..... 45         |
| d.                          | Torque total ..... 45                                     |
| e.                          | Potencia requerida ..... 46                               |
| f.                          | Potencia de operación de los motores ..... 47             |
| 2.2.2                       | Cálculo del diámetro de la llanta ..... 47                |
| 2.3                         | Diseño del sistema de transmisión..... 47                 |
| 2.3.1                       | Potencia transmitida..... 47                              |
| 2.3.2                       | Potencia de diseño..... 48                                |
| 2.3.3                       | Relación de transmisión..... 48                           |
| 2.3.4                       | Selección del tipo de cadena, piñón y catarina ..... 48   |
| 2.3.5                       | Cálculo del número de dientes de la catarina ..... 49     |
| 2.3.6                       | Diámetros de paso mediante fórmula..... 50                |
| 2.3.7                       | Longitud de pasos ..... 51                                |
| 2.3.8                       | Distancia teórica entre centros..... 51                   |
| 2.3.9                       | Ángulo de contacto de la cadena ..... 51                  |
| 2.3.10                      | Tensión de la cadena ..... 52                             |
| 2.3.11                      | Velocidad de la cadena ..... 52                           |
| 2.3.12                      | Verificación de la máxima carga permitida..... 52         |
| 2.3.13                      | Velocidad lineal real ..... 53                            |
| 2.3.14                      | Potencia real ..... 53                                    |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.3.15 | Velocidad angular real.....                                 | 53 |
| 2.4    | Diseño de ejes .....  | 54 |
| 2.4.1  | Eje de la rueda .....                                       | 54 |
| a.     | Peso en cada rueda .....                                    | 55 |
| b.     | Diagrama de carga en el eje Y-X .....                       | 57 |
| c.     | Diagrama de fuerza cortante.....                            | 57 |
| d.     | Diagrama de momento flexionante .....                       | 57 |
| e.     | Diagrama de carga en el eje Z-X .....                       | 58 |
| f.     | Diagrama de fuerza cortante.....                            | 58 |
| g.     | Diagrama de momento flexionante .....                       | 58 |
| h.     | Selección del rodamiento.....                               | 60 |
| 2.4.2  | Eje del motor .....   | 62 |
| a.     | Diagrama de carga en el eje Z-X .....                       | 64 |
| b.     | Diagrama de fuerza cortante.....                            | 64 |
| c.     | Diagrama de momento flexionante .....                       | 64 |
| d.     | Selección del rodamiento.....                               | 66 |
| 2.5    | Análisis Estructural de la plataforma omnidireccional ..... | 67 |
| 2.5.1  | Teoría de Von Mises .....                                   | 67 |
| 2.5.2  | Desplazamientos Resultantes.....                            | 67 |
| 2.5.3  | Factor de seguridad .....                                   | 67 |
| 2.5.4  | Eje de la rueda.....  | 67 |
| 2.5.5  | Eje del motor .....   | 70 |
| 2.5.6  | Estructura base .....                                       | 73 |
| 2.6    | Selección de componentes eléctricos y de control.....       | 75 |
| 2.6.1  | Actuadores .....  | 77 |
| 2.6.2  | Sensores .....  | 78 |
| a.     | Encoder.....  | 78 |
| b.     | Tacómetro .....   | 79 |
| c.     | Sensor de temperatura.....                                  | 79 |
| 2.6.3  | Elementos de Control.....                                   | 80 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| a.    | Eglobal Fanless mini PC i7. ....  | 81 |
| 2.6.4 | Elementos de transmisión .....  | 82 |
| a.    | USB2Dynamixel Adapter.....  | 83 |
| 2.6.5 | Dispositivos de Entrada.....  | 84 |
| 2.6.6 | Baterías.....   | 84 |
| a.    | ZIPPY Compact 5800mAh .....   | 86 |
| 2.7   | Diseño y construcción de los sistemas de control y potencia para la plataforma omnidireccional..... | 87 |
| 2.7.1 | Sistema de potencia.....  | 88 |
| 2.7.2 | Sistema de control.....   | 88 |
| 2.8   | Construcción y ensamblaje de la plataforma móvil omnidireccional                                    | 90 |
| 2.9   | Construcción .....  | 91 |
| 2.9.1 | Construcción de la matriz y estructura de aluminio.....   | 91 |
| 2.10  | Ensamblaje de la plataforma móvil .....   | 95 |

### **CAPÍTULO III**

|                                   |  |     |
|-----------------------------------|--|-----|
| <b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b> | <b>100</b>   |     |
| 3.1                               | Movimiento omnidireccional de la plataforma robótica.....        | 100 |
| 3.2                               | Pruebas de funcionamiento.....                                   | 100 |
| 3.2.1                             | Pruebas de trayectoria .....                                     | 101 |
| a.                                | Parquet de madera.....   | 101 |
| b.                                | Piso de goma .....   | 104 |
| c.                                | Desviación de trayectoria .....                                  | 108 |
| 3.2.2                             | Pruebas de velocidad lineal y maniobrabilidad con carga .....    | 109 |
| 3.2.3                             | Pruebas de velocidad angular de la plataforma omnidireccional .. | 117 |
| 3.2.4                             | Pruebas de maniobrabilidad.....                                  | 118 |
| 3.3                               | Validación de la hipótesis.....                                  | 120 |
| 3.3.1                             | Planteamiento de la hipótesis .....                              | 120 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 3.3.2 | Validación de la hipótesis.....      | 120 |
| 3.4   | Análisis Económico del proyecto..... | 120 |

#### **CAPÍTULO IV**

|     |  |            |
|-----|--|------------|
|     | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b> | <b>125</b> |
| 4.1 | <b>CONCLUSIONES .....</b>                  | <b>125</b> |
| 4.2 | <b>RECOMENDACIONES .....</b>               | <b>126</b> |
|     | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>    | <b>127</b> |
|     | <b>ANEXOS.....</b>                         | <b>130</b> |
|     | <b>CERTIFICACIÓN.....</b>                  | <b>131</b> |

**ANEXO A:** CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LAS RUEDAS OMNIDIRECCIONALES MECANUM

**ANEXO B:** COEFICIENTES DE ROZAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO NYLON-CONCRETO

**ANEXO C:** CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MOTOR DYNAMIXEL PRO H54-200-S500

**ANEXO D:** FACTORES DE SERVICIO

**ANEXO E:** CONFIGURACIÓN AB DE LAS RUEDAS OMNIDIRECCIONALES

**ANEXO F:** TABLA DE SELECCIÓN DE CADENA RS35-2

**ANEXO G:** TABLA DE POTENCIA MÁXIMA PARA CADENA RS35-2

**ANEXO H:** TIPO DE LUBRICACIÓN PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR CADENA

**ANEXO I:** FACTOR DE MÚLTIPLES HILERAS PARA CADENAS

**ANEXO J:** TABLA DE DIMENSIONES PARA PIÑONEZ Y CATARINAS D35-11 Y D35-22

**ANEXO K:** COEFICIENTE DE VELOCIDAD DE LA CADENA

- ANEXO L:** MÁXIMA CARGA ADMISIBLE PARA CADENA RS35-2
- ANEXO M:** PROPIEDADES TÍPICAS DEL ALUMINIO
- ANEXO N:** CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS RODAMIENTO FAG UC201-08
- ANEXO O:** TABLA DE FACTORES PARA HORAS DE SERVICIO
- ANEXO P:** CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS RODAMIENTO FAG SBPFL201-08
- ANEXO Q:** PLANOS MECÁNICOS

## ÍNDICE DE TABLAS

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| <b>Tabla 1</b>  | Ventajas y desventajas de sistemas de locomoción de robots móviles..... | 18  |
| <b>Tabla 2</b>  | Comparación del comportamiento de las bandas de transmisión .           | 33  |
| <b>Tabla 3</b>  | Ventajas y desventajas de los mecanismos de transmisión .....           | 38  |
| <b>Tabla 4</b>  | Tabla de Ponderaciones.....   | 76  |
| <b>Tabla 5</b>  | Motores Disponibles .....   | 77  |
| <b>Tabla 6</b>  | Controladores disponibles .....   | 80  |
| <b>Tabla 7</b>  | Característica Técnicas del computador industrial .....                 | 81  |
| <b>Tabla 8</b>  | Transmisores RS485.....   | 82  |
| <b>Tabla 9</b>  | Características USB2Dynamixel Adapter .....                             | 84  |
| <b>Tabla 10</b> | Parámetros de selección de la batería .....                             | 85  |
| <b>Tabla 11</b> | Características Técnicas de ZIPPY Compact 5800mAh.....                  | 87  |
| <b>Tabla 12</b> | Margen de desviación de trayectoria .....                               | 108 |
| <b>Tabla 13</b> | Piso de prueba: Concreto Pulido .....                                   | 109 |
| <b>Tabla 14</b> | Piso de prueba: Mármol.....   | 112 |
| <b>Tabla 15</b> | Piso de prueba: Concreto .....  | 114 |
| <b>Tabla 16</b> | Error porcentual de la velocidad lineal.....                            | 116 |
| <b>Tabla 17</b> | Datos de velocidad angular de la plataforma.....                        | 117 |
| <b>Tabla 18</b> | Tiempo de ejecución en pista de obstáculos .....                        | 118 |
| <b>Tabla 19</b> | Costos del proyecto .....   | 121 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Robot móvil con ruedas .....  | 5  |
| <b>Figura 2</b> Locomoción Diferencial.....   | 6  |
| <b>Figura 3</b> Locomoción Síncrona .....   | 7  |
| <b>Figura 4</b> Locomoción de Triciclo, primera configuración .....                                 | 8  |
| <b>Figura 5</b> Locomoción de Triciclo, segunda configuración .....                                 | 8  |
| <b>Figura 6</b> Locomoción tipo Ackerman.....   | 9  |
| <b>Figura 7</b> Robot con locomoción Omnidireccional.....   | 10 |
| <b>Figura 8</b> Robot Omnidireccional de 3 ruedas.....  | 11 |
| <b>Figura 9</b> Robot Omnidireccional de 4 ruedas.....  | 11 |
| <b>Figura 10</b> Robot rover Spirit .....   | 12 |
| <b>Figura 11</b> Robot con locomoción tipo Oruga.....   | 13 |
| <b>Figura 12</b> Robot de seis patas .....  | 14 |
| <b>Figura 13</b> Estructuras de robot omnidireccional de tres ruedas .....                          | 15 |
| <b>Figura 14</b> Disposición de ruedas del robot omnidireccional de 4 ruedas<br>tipo universal..... | 16 |
| <b>Figura 15</b> Disposición de ruedas del robot omnidireccional de 4 ruedas<br>orientables. ....   | 16 |
| <b>Figura 16</b> Robot omnidireccional con 4 ruedas tipo Mecanum .....                              | 17 |
| <b>Figura 17</b> Representación de "movimiento lógicamente eficiente" .....                         | 22 |
| <b>Figura 18</b> Vectores velocidades de dos articulaciones consecutivas.....                       | 23 |
| <b>Figura 19</b> Plataforma respecto al marco global.....   | 26 |
| <b>Figura 20</b> Parámetros para modelado de una rueda sueca .....                                  | 26 |
| <b>Figura 21</b> Cinemática del robot móvil omnidireccional.....                                    | 29 |
| <b>Figura 22</b> Sistema de poleas simple .....   | 31 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 23</b> Tipos de bandas para transmisión .....                         | 32 |
| <b>Figura 24</b> Partes de un engranaje.....                                    | 34 |
| <b>Figura 25</b> Engranaje recto.....   | 35 |
| <b>Figura 26</b> Engranaje helicoidal.....                                      | 35 |
| <b>Figura 27</b> Engranaje helicoidal doble .....                               | 36 |
| <b>Figura 28</b> Cadena de potencia de rodillos.....                            | 37 |
| <b>Figura 29</b> Cadenas Transportadoras de varios tipos .....                  | 37 |
| <b>Figura 30</b> Cadenas de carga de varios tipos.....                          | 38 |
| <b>Figura 31</b> Diseño mecánico de la plataforma omnidireccional .....         | 42 |
| <b>Figura 32</b> Representación de cargas en la plataforma omnidireccional..... | 44 |
| <b>Figura 33</b> Sistema de transmisión por cadena de la plataforma .....       | 45 |
| <b>Figura 34</b> Distancia entre apoyos.....                                    | 55 |
| <b>Figura 35</b> Diagrama de fuerzas en el eje de la rueda .....                | 55 |
| <b>Figura 36</b> Representación de fuerzas en el eje.....                       | 56 |
| <b>Figura 37</b> Diagrama de cargas.....  | 57 |
| <b>Figura 38</b> Diagrama de fuerza cortante.....                               | 57 |
| <b>Figura 39</b> Diagrama de momento flexionante .....                          | 57 |
| <b>Figura 40</b> Diagrama de carga.....   | 58 |
| <b>Figura 41</b> Diagrama de fuerza cortante.....                               | 58 |
| <b>Figura 42</b> Diagrama de momento flexionante .....                          | 58 |
| <b>Figura 43</b> Distancia entre apoyos.....                                    | 62 |
| <b>Figura 44</b> Diagrama de fuerzas.....                                       | 62 |
| <b>Figura 45</b> Representación de esfuerzos .....                              | 63 |
| <b>Figura 46</b> Diagrama de carga.....   | 64 |
| <b>Figura 47</b> Diagrama de fuerza cortante.....                               | 64 |
| <b>Figura 48</b> Diagrama de momento flexionante .....                          | 64 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 49</b> Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en el eje de la rueda.....             | 68 |
| <b>Figura 50</b> Desplazamientos resultantes en el eje de la rueda.....                                | 69 |
| <b>Figura 51</b> Factor de seguridad mínimo en el eje de la rueda .....                                | 70 |
| <b>Figura 52</b> Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en el eje del motor.....               | 71 |
| <b>Figura 53</b> Desplazamientos resultantes en el eje del motor.....                                  | 71 |
| <b>Figura 54</b> Factor de seguridad mínimo en el eje del motor .....                                  | 72 |
| <b>Figura 55</b> Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en la estructura base .....            | 73 |
| <b>Figura 56</b> Desplazamientos resultantes en la estructura base.....                                | 74 |
| <b>Figura 57</b> Factor de seguridad mínimo para la estructura base .....                              | 75 |
| <b>Figura 58</b> Diagrama de bloques del sistema eléctrico y control .....                             | 76 |
| <b>Figura 59</b> Encoder.....  | 79 |
| <b>Figura 60</b> Englobal mini PC .....  | 81 |
| <b>Figura 61</b> USB2Dynamixel Adapter .....   | 83 |
| <b>Figura 62</b> ZIPPY Compact 5800mAh .....   | 86 |
| <b>Figura 63</b> Conexión de las Tarjetas del sistema de potencia .....                                | 88 |
| <b>Figura 64</b> Interfaz de control de la plataforma omnidireccional.....                             | 89 |
| <b>Figura 65</b> Interfaz de ingreso de datos por el usuario .....                                     | 89 |
| <b>Figura 66</b> Matriz de hierro para soporte de la estructura .....                                  | 91 |
| <b>Figura 67</b> Estructura lateral de soporte .....   | 91 |
| <b>Figura 68</b> a) Suelda de estructuras laterales, b) Suelda de placas en estructuras laterales..... | 92 |
| <b>Figura 69</b> a) Suelda de perfiles transversales, b) Estructura base soldada                       | 92 |
| <b>Figura 70</b> Medición y corte de las tapas.....  | 93 |
| <b>Figura 71</b> Suelda de los perfiles en U .....   | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 72</b> Tensores de duralón para las cadenas .....   | 94  |
| <b>Figura 73</b> a) Eje para las ruedas, b) Eje para los motores .....  | 94  |
| <b>Figura 74</b> Perforación en ejes para pasadores .....   | 94  |
| <b>Figura 75</b> Estructura base .....  | 95  |
| <b>Figura 76</b> a) Eje del motor acoplado a catarina, b) Motores ensamblados   | 95  |
| <b>Figura 77</b> Ensamblaje de los motores en la estructura base .....  | 96  |
| <b>Figura 78</b> Ensamblaje de los ejes de la rueda y chumaceras de piso.....   | 96  |
| <b>Figura 79</b> Montaje de las cadenas .....   | 97  |
| <b>Figura 80</b> a) Montaje de la caja de baterías y soporte de la Pc, b) Caja<br>de baterías, c) Soporte de Pc ..... | 97  |
| <b>Figura 81</b> Montaje de placas laterales y tensores .....   | 98  |
| <b>Figura 82</b> Montaje de placas de control, Pc y baterías .....  | 98  |
| <b>Figura 83</b> Montaje de las llantas omnidireccionales.....  | 99  |
| <b>Figura 84</b> Ensamblaje final de la plataforma móvil omnidireccional.....   | 99  |
| <b>Figura 85</b> Plataforma móvil omnidireccional sobre parquet de madera ....  | 101 |
| <b>Figura 86</b> Desplazamiento de la plataforma a 0° .....   | 102 |
| <b>Figura 87</b> Desplazamiento de la plataforma a 180° .....   | 102 |
| <b>Figura 88</b> Desplazamiento de la plataforma a 90° y rotación en sentido<br>horario.....                          | 103 |
| <b>Figura 89</b> Desplazamiento de la plataforma a 240° .....   | 103 |
| <b>Figura 90</b> Desplazamiento de la plataforma a 60° .....  | 103 |
| <b>Figura 91</b> Desplazamiento de la plataforma a 160° .....   | 104 |
| <b>Figura 92</b> Desplazamiento de la plataforma a 300° .....   | 104 |
| <b>Figura 93</b> Plataforma móvil omnidireccional sobre piso de goma (tatami)   | 105 |
| <b>Figura 94</b> Desplazamiento de la plataforma a 90° .....  | 105 |
| <b>Figura 95</b> Rotación horaria de la plataforma .....  | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 96</b> Desplazamiento de la plataforma a $315^\circ$ .....                          | 106 |
| <b>Figura 97</b> Desplazamiento de la plataforma a $75^\circ$ .....                           | 107 |
| <b>Figura 98</b> Desplazamiento de la plataforma a $110^\circ$ .....                          | 107 |
| <b>Figura 99</b> Rotación anti horaria de la plataforma .....                                 | 107 |
| <b>Figura 100</b> Desplazamiento de la plataforma a $120^\circ$ y retorno a $180^\circ$ ..... | 108 |
| <b>Figura 101</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical                 | 110 |
| <b>Figura 102</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>horizontal .....      | 111 |
| <b>Figura 103</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>diagonal .....        | 111 |
| <b>Figura 104</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical                 | 113 |
| <b>Figura 105</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>horizontal .....      | 113 |
| <b>Figura 106</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>diagonal .....        | 113 |
| <b>Figura 107</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical                 | 115 |
| <b>Figura 108</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>horizontal .....      | 115 |
| <b>Figura 109</b> Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento<br>diagonal .....        | 115 |
| <b>Figura 110</b> Pista de obstáculos .....   | 119 |
| <b>Figura 111</b> Evasión de obstáculos .....   | 119 |

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación realiza la investigación de la maniobrabilidad de un sistema de tracción omnidireccional. El manipulador móvil consta de 3 partes, un brazo robótico de cinco grados de libertad, una plataforma mecánica móvil unidireccional y el sistema de tracción omnidireccional, siendo éste último, el tema desarrollado en el presente trabajo. La estructura consta de cuatro llantas omnidireccionales acopladas a la plataforma móvil en la parte inferior capaces de soportar un peso mínimo de 10kg cada una, cuatro motores para el movimiento y control de las ruedas con un rango de giro de 0° a 360°. El sistema de tracción propuesto se diseñó a partir de las condiciones existentes como son, medidas de la plataforma móvil unidireccional, diseño del brazo robótico, pesos mínimos a soportar, potencia máxima de salida en los motores, rangos de giro, diámetro necesario de las ruedas. Por tanto, el diseño se ajustó a los parámetros solicitados dentro del proyecto “TELE – OPERACIÓN BILATERAL CORPORATIVO DE MÚLTIPLES MANIPULADORES MÓVILES”. En lo que se refiere a la parte electrónica y de control para el sistema de tracción, se utilizó una herramienta informática adecuada conforme se seleccionaron los motores comprobando su correcto funcionamiento antes de su implementación. Por último, el desarrollo del sistema electrónico y de control para el brazo robótico fue realizado paralelamente por otro grupo de investigación que colaboró en la ejecución de este proyecto, necesarios para la movilidad autónoma que complementan el desarrollo de la plataforma móvil.

### ***PALABRAS CLAVE:***

- **ROBOT MÓVIL**
- **ROBÓTICA**
- **SISTEMAS DE TRACCIÓN**
- **PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL**

## ABSTRACT

This work is centered in the investigation of the maneuverability of an omnidirectional traction system. The manipulator mobile consists of 3 parts: a robotic arm of five degrees of freedom, a unidirectional mechanical mobile platform, and a traction system; which is omnidirectional. The structure consists of four omnidirectional wheels coupled to the mobile platform, which can support a minimum weight of 10kg/each. It also, counts with four motors for the movement and the control of the wheels with a rotation range of 0 ° to 360 °. This investigation is based in the principles of a unidirectional mobile platform, robotic arm design, minimum weight to withstand, maximum output power in engines, turning ranges, and required wheel diameter. Therefore, the design was adjusted to the parameters requested for the project "TELE - BILATERAL MULTIPLE MOBILE MANIPULATOR OPERATION". It was also necessary to work with a suitable computer tool, which selected and checked the correct operation and functioning of each part that complement the traction system before its implementation. Finally, the development of the electronic and control system for the robotic arm was carried out in parallel by another research group that collaborated in the execution of this project. Necessary tool for the autonomous mobility that complement the development of the mobile platform.

### ***KEYWORDS:***

- **MOBILE ROBOT**
- **ROBOTICS**
- **TRACTION SYSTEM**
- **OMNIDIRECTIONAL PLATFORM**

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

A lo largo del desarrollo tecnológico e industrial se ha visto inmerso un sin número de riesgos y accidentes ocasionados en los operarios humanos debido a la manipulación de objetos y ejecución de tareas dentro de ambientes peligrosos. La necesidad de suplantar físicamente al recurso humano en estas tareas ha sido un tema de interés en los últimos años. Se ha buscado desarrollar máquinas o manipuladores que puedan transportar de cierta manera la capacidad de operación de los trabajadores hacia lugares en donde su seguridad se ve amenazada.

El más claro ejemplo y que ha causado un gran impacto tanto a nivel industrial como humano en los últimos años, es el accidente nuclear de Fukushima ocurrido en el 2011, cuando el complejo nuclear diseñado por la compañía General Electric y construido y gestionado independientemente por la compañía japonesa TEPCO, sufrió una serie de fallos en los equipos y reactores lo cual produjo la pérdida de control total sobre la central.

Debido a estas circunstancias se han desarrollado robots que puedan acceder a los lugares más remotos dentro de la central y permitir así una posibilidad de análisis para el desmantelamiento de los reactores. La utilización de robots omnidireccionales ha sido un factor crucial debido a su maniobrabilidad en lugares reducidos y de difícil acceso. Una tecnología que va ganando importancia por la posibilidad de introducirse en espacios mínimos de trabajo, y que su desarrollo actualmente se encuentra en pleno auge.

Vista la importancia y la necesidad de este tipo de sistemas en un caso real y trascendente, impera ofrecer no sólo un manipulador que suplante al operador en tales situaciones, sino también, un sistema de tracción más flexible que permita trabajar en zonas reducidas y en donde uno de los

factores a considerar sea el mínimo movimiento que puede tener el manipulador móvil.

### **1.1. Robots omnidireccionales**

En las últimas décadas han sido notorios los cambios en la tecnología implementada en la robótica, ya sea en hardware o software del mismo, dando paso así a mecanismos de desplazamiento y sistemas de control más avanzados y compactos con un grado de eficiencia superior. Dentro del inmenso campo que es la robótica y sus distintas clases, se encuentran los robots de arquitectura móvil que tienen la capacidad de desplazarse de un punto a otro ya sea siguiendo trayectorias rectas, curvas o una combinación de las dos, inmerso dentro de esta clase se encuentran los robots omnidireccionales los cuales se han abierto campo con mejoras en los sistemas principales que realizan su función proporcionándole la habilidad de realizar movimientos frontales, laterales y rotacionales, obteniendo una mayor maniobrabilidad, permitiendo de esta manera llegar a lugares difíciles y complejos de acceder. (Martínez, 2012)

A diferencia de los otros robots de la clase móvil un robot omnidireccional se beneficia de poseer la máxima maniobrabilidad en un plano, es decir, que alcanza a moverse en cualquier dirección sin tener cambiar su orientación. Estos movimientos son permitidos gracias a sus ruedas especiales las que poseen dos componentes una activa y otra pasiva, la primera brinda la tracción en una dirección y la segunda en otra dirección distinta, a estas ruedas se las conoce con el nombre de ruedas universales.

Estableciendo una comparativa entre los robots móviles se denota que el tiempo y la precisión requerida para evadir un obstáculo o seguir una trayectoria compleja son mayor que un robot móvil estándar, estos factores van de la mano con el tipo de ruedas que utilicen y su arquitectura. Entonces cabe notar que lo que define el grado de libertad en un robot móvil son las ruedas y como han sido distribuidas en la plataforma lo que define los posibles movimientos que pueda poseer.

Son varias las importancias y aplicaciones de los robots omnidireccionales por ejemplo estos se pueden mover en espacios pequeños, si se presenta un



inconveniente en su camino son capaces de efectuar cambios rápidos en su dirección y sentido, como aspecto clave esta su independencia entre el desplazamiento y la orientación, por lo tanto, el control resulta ser significativamente más sencillo de implementar.

## 1.2. Sistemas de Locomoción

Al hablar de sistemas de locomoción se pueden distinguir dos tipos, la locomoción humana y la locomoción de máquinas. Para comprender mejor este concepto, se cita a continuación la definición de locomoción humana propuesta por Latash M., (1998). “Es una acción motora durante la cual la localización del cuerpo humano cambia en el espacio” (p. 172-173). Por tanto, al ser de interés en este documento la locomoción de robots móviles se ampliará el contenido a continuación.

## 1.3. Tipos de ruedas

Existen algunos tipos de ruedas que pueden ser empleadas por los robots móviles para lograr el movimiento de la plataforma, entre las que se encuentran:

### 1.3.1 Ruedas convencionales

- **Rueda motriz:** Es aquella que proporciona la fuerza de tracción al robot.
- **Rueda directriz:** Son ruedas de direccionamiento de orientación controlable.
- **Ruedas fijas:** Estas ruedas giran únicamente en torno a su eje sin tracción motriz.
- **Ruedas locas o ruedas de castor:** Son ruedas orientables pero no controlables.

### 1.3.2 Ruedas suecas

Se basan en una idea simple, una componente activa provee tracción en una dirección, mientras que una componente pasiva provee tracción en una dirección distinta a la anterior.

- **Rueda omnidireccional:** Los rodillos presentes en la periferia de la llanta son los encargados de proveer la componente pasiva la cual es perpendicular a la componente activa.
- **Rueda mecanum:** En este tipo de ruedas “la componente pasiva forma un ángulo de 45° respecto a la componente activa” (Imbaquingo; 2013, p. 10).

### 1.5. Sistemas de locomoción de robots móviles

La locomoción es la responsable de permitir el movimiento (traslación y rotación) del robot móvil sobre una superficie sólida. El medio para realizar tal acción puede variar de acuerdo al sistema de locomoción que más se adapte a las necesidades de cada diseñador.

Dentro de las características más importantes a considerar en la locomoción para un robot móvil se encuentran:

- Maniobrabilidad, relacionado con la facilidad para el manejo del robot.
- Controlabilidad, hace referencia a la estabilización del robot en las posibles trayectorias que se presenten.
- Tracción, depende del tipo de terreno.
- Capacidad para subir pendientes.
- Estabilidad, de la capacidad para mantener en equilibrio el sistema.
- Eficiencia, lograr un efecto con el mínimo de recursos posibles.
- Mantenimiento y alimentación (baterías y otros).
- Impacto ambiental, referente al tipo de actuador.

Existen diferentes formas en las que un robot puede moverse a través de un terreno, entre los tipos de locomoción más comunes se puede apreciar:

- Con ruedas
  - Diferencial
  - Síncrona
  - Triciclo
  - Ackerman
  - Omnidireccionales
- Cintas de deslizamiento.

- Con patas.

### 1.3.3 Robots móviles con ruedas

Es probablemente, el tipo de locomoción más conocido y empleado dadas las características que ofrece, son más sencillos y fáciles de construir, requieren menor complejidad en su implementación, relativamente su uso y mantenimiento son más baratos a diferencia de otros tipos, la estabilidad para un vehículo con este modelo de locomoción se puede garantizar con la presencia de 3 ruedas, siempre y cuando el centro de gravedad se encuentre ubicado al interior del triángulo que forman los puntos de contacto con la superficie de las ruedas.

Sin embargo, el principal inconveniente que presenta su empleo es el trabajo en terreno irregular, ya que son más propensos a que sus ruedas sufran daños dependiendo del entorno en el que se movilizan. Además, les resulta prácticamente imposible superar obstáculos cuya altura sobrepase el radio de las llantas que posee el robot móvil, siendo un limitante considerable al momento de realizar tareas de importancia como la manipulación de materiales peligrosos, rescate de personas, vigilancia de campo, etc.

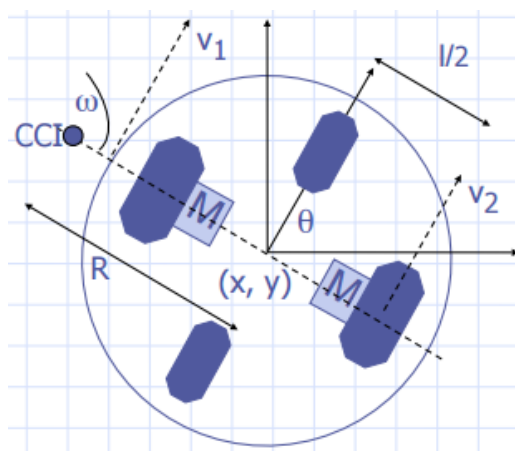


**Figura 1 Robot móvil con ruedas**

**Fuente:** (González, 2004)

### 1.5.2 Locomoción Diferencial

En este tipo de locomoción no existe la presencia de ruedas directrices y el cambio de dirección se logra al modificar la velocidad relativa de las ruedas izquierda y derecha del robot móvil. La rotación del robot se da alrededor del punto de contacto del eje común de las ruedas de tracción, en donde su trayectoria estará dada por las velocidades relativas de cada una de las ruedas.



**Figura 2 Locomoción Diferencial**

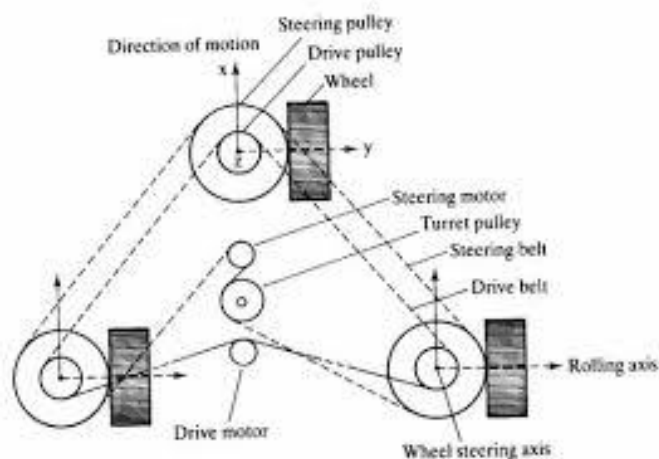
**Fuente:** (García, 2006)

Es un sistema barato y sencillo de construir con un diseño simple, su mayor problema radica en el control de precisión para trayectorias rectas, ocasionando inconvenientes en su deslizamiento. Suelen adaptarse un par de ruedas de apoyo (ruedas locas) para resolver el problema de equilibrio que se presenta en este tipo de robot, sin embargo, al encontrarse cada rueda en una superficie diferente se pueden dar problemas de pérdida de tracción con lo que la complejidad en el control del sistema se compensa con la sencillez del diseño mecánico.

### 1.5.3 Locomoción Síncrona

Para este tipo de diseño todas sus ruedas, generalmente 3, están apuntando hacia la misma dirección y son tanto directrices como motrices. Un

eje vertical permite el cambio de dirección del robot al girar simultáneamente sus ruedas y manteniendo la dirección del chasis, si el diseño contempla una parte delantera, es necesario un mecanismo adicional que permita mantener la misma dirección del chasis con las ruedas.



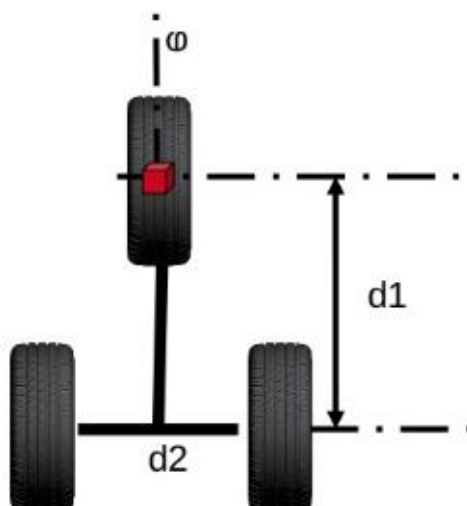
**Figura 3 Locomoción Síncrona**

**Fuente:** (Méndez, 2007)

Al existir motores separados para la traslación y rotación de las ruedas, hacen el control más sencillo, en donde el primer motor define la velocidad del robot, mientras que el segundo establece su orientación; además el movimiento en línea recta se ve solucionado mecánicamente. Por otra parte, existe una mayor complejidad en su diseño e implementación y posee también restricciones holónomas.

#### 1.5.4 Locomoción de Triciclo

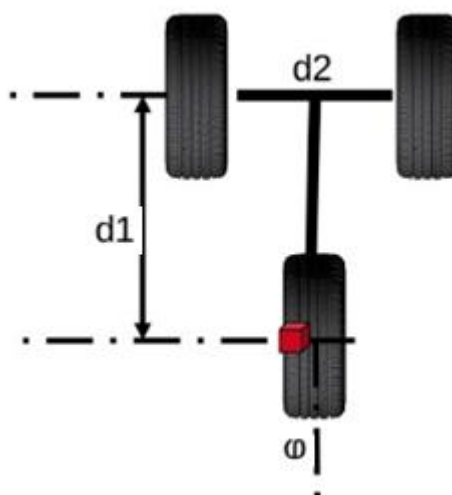
Se puede apreciar dos configuraciones muy similares en donde la rueda libre tendrá el mismo trabajo y sus ruedas traseras estarán fijas. En la primera configuración (ver figura 4), la rueda delantera sirve para la tracción y dirección del vehículo y su eje trasero compuesto por dos ruedas se mueven libremente.



**Figura 4 Locomoción de Triciclo, primera configuración**

**Fuente:** (Moctezuma, 2016)

En la segunda configuración (ver figura 5), la rueda libre se encuentra en la parte de atrás pero su funcionamiento es el mismo, contribuye con la tracción y dirección del vehículo, mientras su parte delantera compuesta en esta ocasión por las dos ruedas fijas, se mueven libremente.



**Figura 5 Locomoción de Triciclo, segunda configuración**

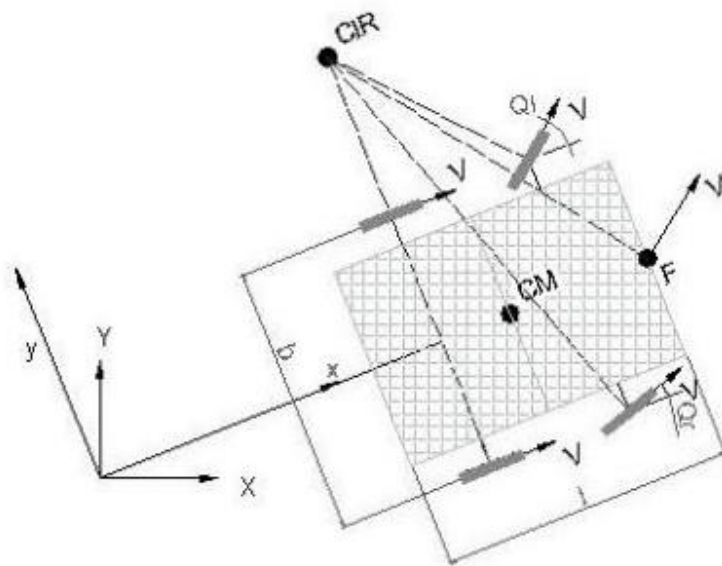
**Fuente:** (Moctezuma, 2016)

Ambos tipos de configuración presentan buena estabilidad y sencillez en su diseño mecánico, tienen gran facilidad para desplazarse en línea recta, pero se ven restringidos sus movimientos para giros en ángulos de  $-90^\circ$  o  $+90^\circ$ , su mayor inconveniente es que requieren de guiado no holónomo, es decir, no pueden moverse lateralmente debido al deslizamiento de las ruedas.

### 1.5.5 Locomoción Ackerman

También denominado tipo coche, es la configuración más utilizada por los vehículos convencionales de cuatro ruedas. Su sistema está basado en cuatro ruedas montadas sobre el chasis, dos ruedas sirven para dar tracción al vehículo, mientras que las otras dos para generar la dirección del movimiento.

La rueda delantera interior gira un ángulo ligeramente superior a la exterior para eliminar el deslizamiento. Las prolongaciones de los ejes de las dos ruedas delanteras intersecan en un punto sobre la prolongación del eje de las ruedas traseras. El lugar de los puntos trazados sobre el suelo por los centros de los neumáticos son circunferencias concéntricas con centro el eje de rotación P, (ver figura 6). (Hernández; 2008, p.49).



**Figura 6 Locomoción tipo Ackerman**

**Fuente:** (Drakos, 2011)

Este tipo de sistema es de fácil implementación ya que consta de un sistema simple de cuatro barras que controlan la dirección, puede alcanzar altas velocidades y presenta un desplazamiento reducido. Al igual que otros sistemas el problema que posee son las restricciones no holónomas.

### 1.5.6 Locomoción Omnidireccional

Son varios los problemas que presentan los sistemas de locomoción tradicionales, algunos incluso son difíciles de solucionar y se debe recurrir a modelos complejos para reducir en algo tales inconvenientes. Un ejemplo que se puede evidenciar a diario y a la mayoría de personas les ha pasado, son las tantas maniobras necesarias para estacionar un vehículo en un aparcamiento con poco espacio. Problema que puede ser resuelto con un sistema denominado omnidireccional o también conocido como holónomo.

Este tipo de sistema permite modificar de forma instantánea la orientación del vehículo sin la necesidad de haber rotado previamente, lo que reduce el tiempo en el que se desplaza el robot. La mayor ventaja de este tipo de locomoción es la maniobrabilidad que permite con el vehículo, tanto en el diseño mecánico como en el control.



**Figura 7 Robot con locomoción Omnidireccional**

**Fuente:** (Grupo Carman, 2015)

Su composición es básicamente la introducción de varias ruedas o rodillos en común dentro de una rueda más grande, en donde estos rodillos se orientan de forma perpendicular a la dirección en la cual ocurre el avance, de



esta manera al ser aplicada una fuerza lateral, los rodillos giran sobre su propio eje y permiten generar velocidad en la misma dirección del eje de giro.

Por lo general, estos sistemas están compuestos por tres o cuatro ruedas montadas en el chasis, la primera configuración (ver figura 8) puede resultar más sencilla y económica de implementar, tanto en su control como en la mecánica de diseño, mientras que la segunda configuración (ver figura 9) representa una mayor maniobrabilidad en situaciones que requieren movimientos más sincronizados y precisos; en ambos casos la complejidad en el control es más difícil que otros sistemas debido a los factores que se deben considerar tales como el material de las ruedas, coeficiente de rozamiento entre el material y la superficie en la que se desplaza, ángulo de desplazamiento, velocidad y peso del robot.



**Figura 8 Robot Omnidireccional de 3 ruedas**

**Fuente:** (electric Briks, 2010)



**Figura 9 Robot Omnidireccional de 4 ruedas**

**Fuente:** (León, 2013)

### 1.5.7 Locomoción por Cintas de Deslizamiento

Presentan una gran ventaja frente a los demás sistemas existentes ya que pueden desplazarse sobre terrenos irregulares tales como: nieve, arena, arcilla, piedra, etc. Por tanto, la movilidad y controlabilidad que caracteriza a este tipo de locomoción se ven fuertemente relacionadas con la interacción del vehículo y la superficie de contacto.

Si se hace una comparación entre los sistemas con ruedas y los sistemas con orugas, la eficiencia energética frente a la distancia que recorre el primero, se ve afectada con el paso del tiempo ya que disminuye la energía a medida que el terreno se torna más irregular, condición que se vuelve crítica si la función del robot conlleva tareas de rescate o manipulación de explosivos, un ejemplo claro que cita Gonzáles Ramón et al. (2015) es el del robot *rover Spirit* (ver figura 10), el cual permanece inmóvil en una duna en Marte desde el año 2009 y gran parte de la misión científica se ha abortado.



**Figura 10 Robot rover Spirit**

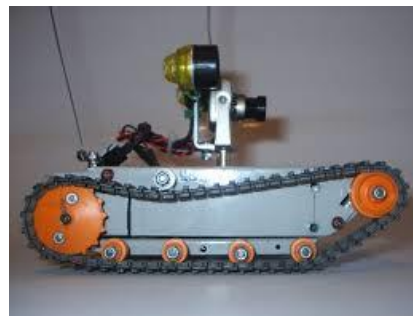
**Fuente:** (NASA/JPL/Cornell University, 2003)

En la figura anterior se puede observar que su sistema de locomoción a base de ruedas no constituyó la mejor alternativa para la tarea de exploración en un terreno tan irregular como lo es Marte, afectando significativamente la misión y ocasionando pérdidas millonarias.

El centro de gravedad del vehículo se mantiene bajo, luego se consigue una buena estabilidad y movilidad. Las orugas generan baja presión en el

suelo, incluso ante una elevada carga, lo que lleva a conservar mejor el terreno y el entorno en el que opera el vehículo. Esto motiva la elevada aplicación en agricultura y en actividades mineras, (González et al., 2015).

Sin embargo, el mayor problema que se puede presentar en los sistemas de locomoción por orugas es el gran consumo de potencia que se produce por el rozamiento en los giros y la fuerte vibración en el robot a causa de la superficie irregular.



**Figura 11 Robot con locomoción tipo Oruga**

**Fuente:** (León, 2013)

### **1.5.8 Locomoción por Patas**

De acuerdo con Ollero (2001), los robots con patas “permiten aislar el cuerpo del terreno empleando únicamente puntos discretos de soporte” (p. 34). El diseño, construcción y control para estos robots presentan mayor dificultad debido a las configuraciones existentes (de 2, 4, y 6 patas comúnmente), sin embargo, su manejo es posible prácticamente en todos los terrenos en los cuales el ser humano puede desenvolverse.

Los mecanismos integrados dentro de este tipo de locomoción son más complejos y el consumo energético es alto a diferencia de otros sistemas. La configuración clásica es la de seis patas (ver figura 12), aunque existen también robots que cuentan con 8 patas como el desarrollado por la Carnegie Mellon University, el cual fue empleado para la exploración de un volcán en Alaska (1994).

La dificultad del manejo por muchos grados de libertad presentes en esta configuración hace que su control sea más complejo debido a la cantidad de actuadores necesarios para su movimiento.



**Figura 12 Robot de seis patas**

**Fuente:** (SIRSEIR, 2012)

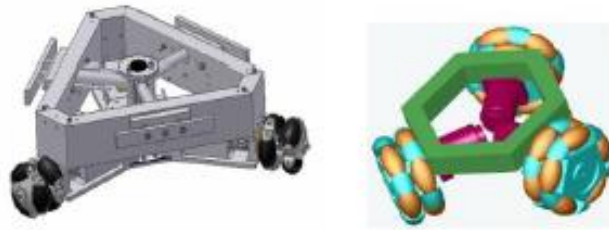
Dentro de este grupo se pueden mencionar a los robots trepadores los cuales pueden ser utilizados para tareas de inspección y reparación en paredes verticales, la forma en la que pueden adherirse a los muros varía dependiendo del tipo de robot, por ejemplo mediante garras, ventosas o dispositivos magnéticos.

#### **1.6. Estructura de un robot omnidireccional.**

Un punto muy importante para la construcción de un robot omnidireccional es la cantidad de ruedas que se utilizara. Desde el punto de vista estructural y disposición de las ruedas se pueden clasificar en robots omnidireccionales de 3 o 4 ruedas. Cada tipo posee ventajas y desventajas en su aplicación. Los vehículos de 3 ruedas tienen control y dirección simple, pero estabilidad y tracción limitada. Los de 4 ruedas tienen mecánica y controles más complejos, pero con mayor estabilidad y tracción.

##### **1.3.4 Omnidireccional de 3 ruedas**

Esta estructura tiene una configuración triangular, es decir posee tres ruedas omnidireccionales las cuales se encuentran dispuestas a  $120^\circ$  entre sí, para este tipo de disposición se usan ruedas universales.



**Figura 13 Estructuras de robot omnidireccional de tres ruedas**

**Fuente:** (Lalama, 2014)

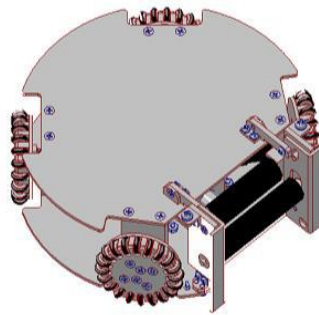
Este tipo de estructuras posee la ventaja de que su control es simple, ya que para cada velocidad deseada del vehículo existe una única combinación en las velocidades de las ruedas (a diferencia de los vehículos omnidireccionales de más de 3 ruedas). A su vez, una determinada combinación de velocidades en las ruedas determina una única velocidad del vehículo. (Lalama, 2014)

#### **1.6.1 Omnidireccional de 4 ruedas**

A diferencia del robot omnidireccional de tres ruedas, que se limita en el uso de ruedas universales simples o dobles y a una disposición triangular de la ruedas, los robots omnidireccionales de cuatro ruedas tienen ventajas en estos dos aspectos mencionados anteriormente ya que tienen más de una disposición en las ruedas y se permiten el uso de más tipos de ruedas. Entre los que se destacan los siguientes:

##### **a. Omnidireccional circular**

Esta estructura consiste en una aproximación similar al omnidireccional de 3 ruedas, en la figura se puede ver la disposición de las ruedas. Este tipo de estructuras posee la ventaja de que tiene redundancia, o sea que para lograr cualquier movimiento en el plano, existen varias combinaciones de velocidades posibles. Otra de las ventajas que presenta esta estructura es que permite detectar si existe deslizamiento en una rueda de forma de tratar el problema.



**Figura 14 Disposición de ruedas del robot omnidireccional de 4 ruedas tipo universal**

**Fuente:** (Santiago Martínez, 2009)

#### **b. Omnidireccional con ruedas orientables**

Las ruedas de este modelo poseen tres grados de libertad, rotación y orientación de la rueda y rotación de los rodillos. Este modelo presenta una ventaja sobre el de cuatro ruedas fijas, esto es, que cuentan con un sistema de transmisión continua. Éste provee al vehículo un uso más eficiente de los motores, al volverse mayor su rango de velocidad. Para aclarar esto, si el plano de las ruedas se encuentra paralelo a la dirección de la trayectoria, no se pierde energía ya que la velocidad lineal de las ruedas no tiene una componente en otro sentido que sea el de la trayectoria (Santiago Martínez, 2009).

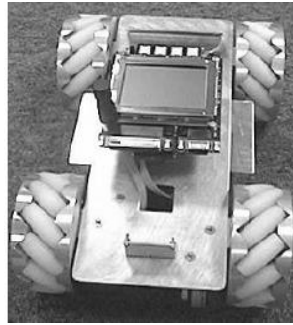


**Figura 15 Disposición de ruedas del robot omnidireccional de 4 ruedas orientables.**

**Fuente:** (Santiago Martínez, 2009)

### c. Omnidireccional Mecanum

Las ruedas mecanum a diferencia de las universales, se ubican de una manera similar a la de un auto. Sus rodillos poseen una rotación de cierto ángulo, por lo general de  $45^\circ$  respecto a la circunferencia exterior de la rueda.



**Figura 16 Robot omnidireccional con 4 ruedas tipo Mecanum**

**Fuente:** (Imbaquingo & Salavarría, 2013)

### 1.7. Investigación de la maniobrabilidad omnidireccional de una plataforma robótica

La precisión en el desplazamiento de una plataforma omnidireccional dependerá del material que estén hechos los rodillos de la rueda Mecanum, debido a que influye en la adherencia de la llanta al piso de contacto, otro punto importante es el terreno en el que se va a movilizar ya que si la superficie no es plana y es irregular podría causar problemas logrando evitar el contacto de la rueda con el piso, lo cual provocaría errores en el desplazamiento; para compensar este punto se lo haría incorporando un sistema de amortiguación, barras de suspensión en la plataforma, permitiendo que se movilece en terrenos con superficies irregulares sin alterar la capacidad omnidireccional.

La máxima maniobrabilidad se obtiene en robots omnidireccionales, ya que se puede movilizar en cualquier dirección sin realizar rotaciones previas, lo cual facilita su desplazamiento en lugares de difícil acceso, caminos estrechos y el transportar en ambientes industriales. Al realizar una comparación con una plataforma unidireccional, esta tiene muchas

limitaciones con respecto al espacio en el cual se movilizara. La estructura de la plataforma es importante ya que de esta dependerá la distribución de las ruedas omnidireccionales en el chasis.

### 1.8. Análisis de las ventajas y desventajas del uso de locomoción omnidireccional

Para profundizar en el análisis del uso de locomoción omnidireccional se muestra a continuación una tabla de las ventajas y desventajas que presentan los sistemas de locomoción antes vistos, posteriormente se realiza una comparación entre las distintas configuraciones y se menciona la utilidad de utilizar un sistema con tracción omnidireccional.

**Tabla 1**

#### **Ventajas y desventajas de sistemas de locomoción de robots móviles**

| LOCOMOCIÓN DE ROBOTS MÓVILES |  |  |
|------------------------------|--|--|
| TIPO DE LOCOMOCIÓN           | VENTAJAS   | DESVENTAJAS  |
| DIFERENCIAL                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración más sencilla.</li> <li>• Económica.</li> <li>• Diseño fácil.</li> <li>• Se puede variar la velocidad fácilmente.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de rozamiento.</li> <li>• Tiempo elevado de recorrido a un punto determinado.</li> <li>• Control de precisión para trayectorias rectas.</li> <li>• Deformación de neumáticos.</li> <li>• No puede superar obstáculos mayores al radio de su rueda.</li> </ul> |
| SÍNCRONA                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Avance en línea recta en forma más precisa.</li> <li>• Motores independientes facilitan el control.</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil implementación.</li> <li>• Diseño complejo.</li> <li>• Sistema costoso.</li> </ul>  |

**CONTINÚA** 



|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
|                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Control en línea recta garantizado mecánicamente.</li> </ul>   |  |
| TRICICLO                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay deslizamiento.</li> <li>• La tracción puede estar tanto en las ruedas traseras como delanteras.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de estabilidad en terrenos irregulares.</li> <li>• Se requiere guiado no holónimo.</li> <li>• Centro de gravedad se mueve a medida que el vehículo se desplaza por una pendiente, lo que causa pérdida de tracción (Ollero, 2001).</li> </ul> |
| ACKERMAN                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil implementación.</li> <li>• Alcanza altas velocidades.</li> <li>• Sistema mayormente utilizado.</li> <li>• Diseño sencillo.</li> <li>• Buena estabilidad.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Restricciones no holónomas.</li> <li>• Ángulos de giro provocan un control complejo.</li> <li>• Limitación en la maniobrabilidad (Ollero, 2001).</li> </ul>   |
| CINTAS DE DESLIZAMIENTO | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de control simple.</li> <li>• Movilidad y controlabilidad en gran variedad de terrenos.</li> <li>• Mayor punto de contacto con la superficie.</li> <li>• Diseño mecánico menos complejo.</li> <li>• Generan baja presión en el suelo, por tanto conservan mejor el terreno.</li> <li>• Buena estabilidad.</li> <li>• Gran adherencia a la superficie.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo alto de energía en los giros.</li> <li>• No existe modelo preciso de giro.</li> <li>• Elevada vibración de la plataforma.</li> <li>• Imposibilidad de realizar trayectorias curvas.</li> </ul>  |

---

|                  |  |   |
|------------------|--|---|
| <b>POR PATAS</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movilidad en casi todos los terrenos.</li> <li>• Capacidad de subir escaleras.</li> <li>• Pueden superar obstáculos con facilidad.</li> <li>• Útil en navegación de campo.</li> <li>• Resistencia al desgaste.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A mayor grado de libertad, mayor complejidad en el control.</li> <li>• Consume mucha energía.</li> <li>• Sistema de equilibrio complicado.</li> <li>• Control de mecanismos complejo.</li> </ul> |
|------------------|--|---|

---

|                        |   |   |
|------------------------|---|---|
| <b>OMNIDIRECCIONAL</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite movimientos complicados.</li> <li>• Movimientos holónomos.</li> <li>• Manejo individual de las ruedas.</li> <li>• Movimiento en cualquier dirección.</li> <li>• Pueden girar sin haber rotado previamente.</li> <li>• Diseño mecánico no es tan complejo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación complicada.</li> <li>• Complejidad en el control.</li> <li>• Costos de implementación.</li> </ul> |
|------------------------|---|---|

---

Una vez citadas las ventajas y desventajas de los distintos sistemas de locomoción utilizados por robots móviles se puede comparar las características que los hacen útiles al momento de seleccionar el modelo de tracción para una plataforma robótica o vehículo no tripulado. Parámetros como el tipo de trabajo al cual va a ser destinado el vehículo, el terreno en el que se va a desplazar, capacidad de carga, consumo de energía, implementación, costo, control de los mecanismos, diseño mecánico, etc.

Uno de los rasgos más comunes que presentan los sistemas vistos es la facilidad de implementación, ya que no requieren mecanismos especiales para su puesta en marcha; el diseño mecánico tampoco representa un problema para la mayoría de configuraciones, únicamente la locomoción

síncrona constituye mayor complejidad en los dos parámetros antes mencionados.

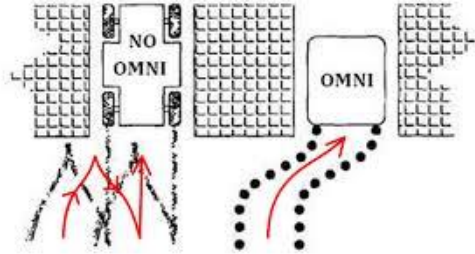
En cuanto a la facilidad en el control resulta menos complicado para las configuraciones de tipo síncrona y ackerman debido a la sencillez de los mecanismos empleados, en el primer caso el uso de motores independientes para la traslación y rotación de la plataforma reducen el problema de combinar movimientos para un mismo actuador, mientras que, para el segundo caso el sistema simple compuesto por cuatro barras es suficiente para controlar la dirección.

Por otro lado, la capacidad de desplazarse en terrenos irregulares y bajo condiciones meteorológicas diferentes es una ventaja de la configuración por cintas de deslizamiento o también llamadas orugas, su adherencia a prácticamente cualquier superficie y centro de gravedad bajo le proporcionan una buena estabilidad en sus movimientos. La locomoción mediante patas supone superioridad en este parámetro debido a que puede moverse en casi todos los terrenos en los que un ser humano puede hacerlo, por ejemplo subir o bajar escaleras, condición que para otros sistemas les resultaría difícil o prácticamente imposible.

Frente a la mayoría de problemas que suponen las configuraciones tradicionales se busca una alternativa que solucione gran parte de éstas, para el caso, el presente estudio se centra en la investigación de la maniobrabilidad de un sistema de locomoción omnidireccional, ahondando en las ventajas y desventajas frente a las demás configuraciones mencionadas.

Y es precisamente la maniobrabilidad la mejor de las características que presenta un sistema omnidireccional, la posibilidad de realizar cualquier movimiento en cualquier dirección es un factor de relevancia para el manejo de una plataforma robótica, la capacidad de poder girar en el mismo lugar sin haber rotado previamente supone una reducción significativa de tiempo en el recorrido a un punto determinado, lo que representa también un ahorro energético y menos desgaste en los actuadores. Un punto sumamente importante de la configuración omnidireccional radica en que ningún sistema

de los antes citados puede realizar un “movimiento lógicamente eficiente”, para entender mejor esta expresión se hace referencia a la siguiente imagen.



**Figura 17 Representación de "movimiento lógicamente eficiente"**

**Fuente:** (Martínez & Sisto, 2010)

Como se observa en la figura 17, para la plataforma no omnidireccional es obligatorio realizar una serie de movimientos antes de alcanzar la posición deseada a un determinado lugar, por otra parte, para la plataforma omnidireccional que cuenta con la posibilidad de efectuar movimientos holónomos, basta con direccionar sus ruedas por el camino lógicamente más corto como lo haría una persona y así alcanzar de forma eficiente la posición deseada. El objetivo se cumple en ambos casos, sin embargo, el recurso tiempo y la característica de maniobrabilidad ha sido superada por la plataforma omnidireccional ampliamente.

### **1.9. Cinemática del movimiento**

La cinemática de un robot se refiere al estudio del movimiento del mismo en el que se encuentra inmerso el análisis de posición, velocidad y aceleración de cada componente del robot sin tomar en cuenta las fuerzas que producen el movimiento y considerando su geometría como un punto clave para su estudio.

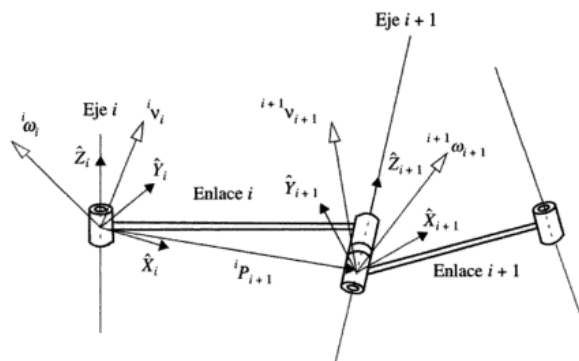
El desarrollo del modelo cinemático para la plataforma omnidireccional del presente trabajo de titulación se basó en el documento propuesto por (Sánchez & Suárez, 2015), en el cual se expone un modelo obtenido por medio de la teoría de propagación de velocidades descrita a continuación.

### 1.9.1 Propagación de velocidades

Esta teoría supone un estudio de la propagación de velocidades por las articulaciones de un robot. Se presume como cuerpos rígidos con movimiento descrito por vectores de velocidades lineales y angulares los enlaces entre dos articulaciones (Ollero Baturone, 2001, pág. 87).

Según el libro del autor (Ollero Baturone, 2001, págs. 87, 88) explica la teoría de la siguiente manera:

Sea  $\{0\}$  la articulación que se toma como referencia. La velocidad lineal del origen del sistema  $\{i\}$  se representará por  $v_i$  y la velocidad angular de este sistema por  $w_i$ . La velocidad del enlace  $i+1$  es la del  $i$  + los componentes que añade la articulación  $i+1$ . En lo que sigue se considera en, primer lugar, la propagación de velocidades en las articulaciones de rotación y a continuación en las de traslación. En la figura 18 se explica lo descrito.



**Figura 18 Vectores velocidades de dos articulaciones consecutivas**

**Fuente:**(Ollero Baturone, 2001)

Se supone, que la articulación considerada es de rotación. Si el eje de esta rotación coincide con el eje  $\hat{Z}$ , la expresión de la velocidad angular del enlace  $i+1$  en términos del sistema en  $\{i\}$  es:

$${}^i\omega_{i+1} = {}^i\omega_i + {}_{i+1}^iR \dot{\theta}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad \text{Ec. 1.1.}$$

Siendo  $\dot{\theta}_{i+1}$  la derivada con respecto al tiempo de la variable articular que, en forma vectorial, se representa como:

$$\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = {}^{i+1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.2.}$$

Y  ${}_{i+1}^iR$  la matriz que rota en el eje  $\{i+1\}$  a su descripción en  $\{i\}$  para poder sumar las dos componentes de velocidades angulares. Asimismo, la velocidad angular del enlace  $i+1$  expresado en  $\{i+1\}$  es:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad \text{Ec. 1.3.}$$

Por otra parte, también en la articulación de rotación, la velocidad lineal  $\{i+1\}$  es la del origen de  $\{i\}$  más una componente originada por la velocidad angular de  $i$ :

$${}^i v_{i+1} = {}^i v_i + {}^i\omega_{i+1} \times {}^i P_{i+1} \quad \text{Ec. 1.4.}$$

Siendo  ${}^i P_{i+1}$  el vector que expresa la posición del origen de  $\{i+1\}$  en el sistema  $\{i\}$ . La expresión resultante de la velocidad con respecto al sistema  $\{i+1\}$  es:

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) \quad \text{Ec. 1.5.}$$

Se consideran ahora articulaciones de traslación. En este caso, las velocidades lineales y angulares son:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\omega_i \quad \text{Ec. 1.6.}$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + d_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad \text{Ec. 1.7.}$$

Todo el procedimiento descrito anteriormente sirvió de base para el desarrollo del modelo cinemático de la plataforma omnidireccional presentada por (Sánchez & Suárez, 2015), del cual se extrajo el proceso y la solución obtenida para un modelo de plataforma idéntico al expuesto en el actual documento.

Con las ecuaciones obtenidas a partir de la teoría de propagación es posible describir las restricciones cinemáticas para la plataforma móvil.

### 1.9.2 Restricciones cinemáticas para la plataforma móvil omnidireccional con ruedas mecanum

Existen dos marcos que intervienen en el modelado de la plataforma, el primero es un marco global respecto a un eje de coordenadas con origen en  $O (x_0 - y_0)$  que permite identificar la posición y velocidad de la plataforma, y el segundo es un marco respecto a la plataforma misma con origen en el punto  $P (x_1 - y_1)$  ubicado en el centro de la plataforma. Gracias a estos marcos se puede expresar un vector posición el cual describe la posición del punto  $P$  como sigue:

$$\xi = [x \quad y \quad \theta]^T \quad \text{Ec. 1.8.}$$

El ángulo  $\theta$  se mide respecto al eje  $\mathbf{x}$ . A continuación se obtiene una matriz de rotación de la posición del punto  $P$ :

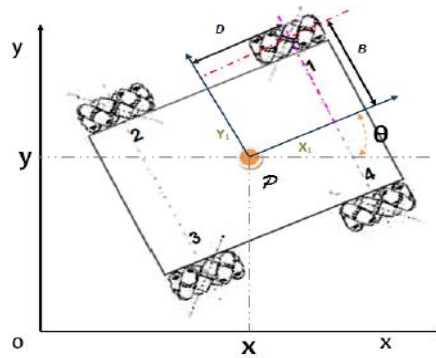
$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.9.}$$

Ahora bien, al propagar las velocidades  $[\dot{x}_1 \dot{y}_1 \dot{\theta}]$  del marco referente a la plataforma  $(x_1 - y_1)$ , al marco de las llantas, relacionando el vector de velocidad de la Ecuación 1.19.

$$\xi_1 = [\dot{x}_1 \dot{y}_1 \dot{\theta}]^T$$

En el punto  $P$  las velocidades lineales se expresan como  $\dot{x}_1$  e  $\dot{y}_1$ , mientras que  $\dot{\theta}$  representa la velocidad angular. En el marco global se describen como:

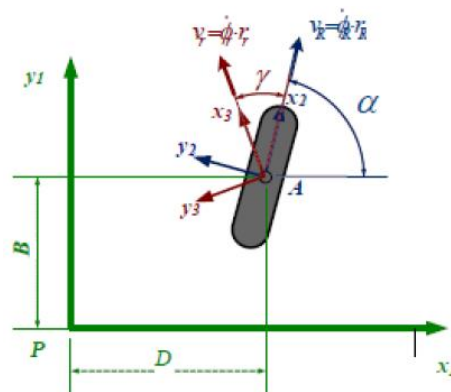
$$\dot{\xi}_1 = R^T(\theta)\dot{\xi}_1 \quad \text{Ec. 1.10.}$$



**Figura 19 Plataforma respecto al marco global**

**Fuente:** (Sánchez & Suárez, 2015, pág. 45)

Para el modelamiento de la rueda es necesario definir algunos parámetros a partir del marco de referencia de la plataforma ( $x_1 - y_1$ ), considerando el ángulo  $\theta$  para la determinación de la matriz de rotación con respecto al eje global. De la figura 20 se pueden expresar las siguientes ecuaciones como siguen:



**Figura 20 Parámetros para modelado de una rueda sueca**

**Fuente:** (Sánchez & Suárez, 2015, pág. 45)

Dónde;

**D:** coordenada de la posición de la rueda respecto a  $x_1$

**B:** coordenada de la posición de la rueda respecto a  $Y_1$

**$\alpha$ :** ángulo que forma la rueda respecto al sistema de referencia ( $x_1 - y_1$ )



$\gamma$ : ángulo del vector velocidad de cada rodillo de las ruedas respecto al sistema  $(x_2 - y_2)$

$v_R$ : velocidad lineal de la rueda

$v_{R'}$ : velocidad lineal del rodillo de la rueda

$\dot{\phi}_{r'}$ : velocidad angular del rodillo

$\dot{\phi}_R$ : velocidad angular de la rueda

$r_{r'}$ : radio del rodillo

$r_R$ : radio de la rueda

$${}^0P_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.11.}$$

La Ecuación 1.11. constituye la posición del sistema de referencia {1}, respecto al marco global {0}.

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.12.}$$

La Ecuación 1.12. constituye la rotación del sistema de referencia {1}, respecto al marco global {0}.

$${}^1P_2 = \begin{bmatrix} d \\ b \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.13.}$$

La Ecuación 1.13. constituye la posición del sistema de referencia {2}, respecto al marco global {1}.

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.14.}$$

La Ecuación 1.14. constituye la rotación del sistema de referencia {2}, respecto al marco global {1}.

$${}^2P_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.15.}$$

La Ecuación 1.15. constituye la posición del sistema de referencia {3}, respecto al marco global {2}.

$${}^2R_3 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.16.}$$

La Ecuación 1.16. constituye la rotación del sistema de referencia {3}, respecto al marco global {2}.

Una vez obtenidas las ecuaciones anteriores se pueden expresar los vectores de velocidades angulares y lineales mediante la aplicación de la teoría de propagación de velocidades descrita anteriormente obteniendo las restricciones cinemáticas de la rueda sueca con respecto al sistema de referencia del robot:

$$\begin{pmatrix} \cos(\gamma + \alpha + \theta) & \sin(\gamma + \alpha) & d * \sin(\gamma + \alpha + \theta) - b * \cos(\gamma + \alpha) \\ -\sin(\gamma + \alpha + \theta) & \cos(\gamma + \alpha) & b * \sin(\gamma + \alpha + \theta) - d * \cos(\gamma + \alpha) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_R * \cos(\gamma) & 1 \\ -r_R * \sin(\gamma) & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{\phi}_R \\ v_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 1.17.}$$

### 1.9.3 Coordenadas generalizadas de configuración

Se toman como consideración las mismas características establecidas en (Sánchez & Suárez, 2015) para la plataforma móvil omnidireccional:

1. Las coordenadas  $x, y$  representan la posición para el punto  $P$ , mientras que el ángulo  $\theta$  define la orientación de la plataforma.
2. Se consideran las coordenadas de rotación de las ruedas a lo largo de su eje horizontal de rotación.
3. Se toman en cuenta también las coordenadas de rotación de los rodillos que se encuentran sobre las ruedas a lo largo del eje de rotación horizontal de éstas.

Dados los parámetros anteriores se describe el vector de coordenadas generalizadas para la plataforma:

$$q = [x \ y \ \theta \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4]^T \quad \text{Ec. 1.18.}$$

El vector de velocidades viene dado por:

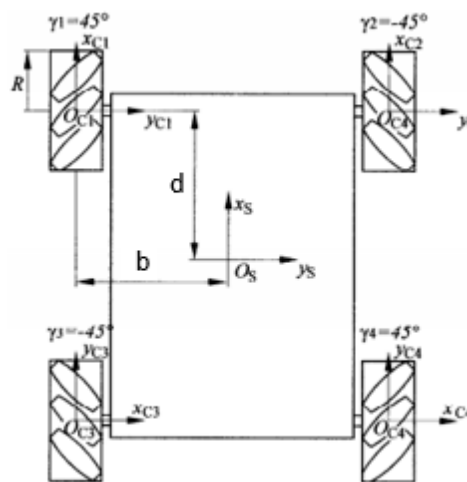
$$\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta} \ \dot{\phi}_1 \ \dot{\phi}_2 \ \dot{\phi}_3 \ \dot{\phi}_4]^T \quad \text{Ec. 1.19.}$$

Finalmente, en el espacio de estados se encuentra una expresión cinemática, estableciendo como variables de estado la velocidad lineal  $v =$

$[v_x \ v_y]^T$  y la velocidad angular  $\omega$  de la plataforma. Se obtiene entonces, una expresión que representa el modelo cinemático para una plataforma móvil omnidireccional de cuatro ruedas:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & -\frac{b+d}{r} \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & -\frac{b+d}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & \frac{b+d}{r} \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & \frac{b+d}{r} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1.20.}$$

Mediante la ecuación 1.20. es posible calcular la velocidad angular a la que se mueve la plataforma omnidireccional si se considera al marco de referencia ( $X_s, Y_s, O_s$ ) ubicado en el centro de la plataforma de la figura 21, entonces se pueden describir las ecuaciones de velocidad como sigue.



**Figura 21 Cinemática del robot móvil omnidireccional**

**Fuente:** (Doroftei, Grosu, & Spinu, 2007)

### 1.10. Mecanismos del movimiento

“Un mecanismo es un dispositivo que transforma el movimiento producido por un elemento motriz (fuerza de entrada) en un movimiento deseado de salida (fuerza de salida) llamado elemento conducido” (Jaramillo; 2015, p. 4).

Existen tres tipos principales de mecanismos de transmisión que pueden ser aplicables al diseño mecánico de un sistema de tracción para una plataforma robótica, seguidamente se presenta una descripción de cada mecanismo analizando las principales características y se realiza la selección del sistema más adecuado conforme al estudio del presente documento.

Se puede diferenciar dos grupos generales de mecanismos que a continuación se muestran:

- **Mecanismos de transmisión del movimiento:** Son aquellos en los que el elemento conductor y el elemento conducido poseen el mismo tipo de movimiento.
- **Mecanismos de transformación del movimiento:** Son aquellos en los que el elemento conductor y el elemento conducido poseen distinto tipo de movimiento.

Dado que en el sistema a construir tanto el elemento motriz como el elemento conducido tendrán el mismo tipo de movimiento, se profundizará en los tipos de mecanismos de transmisión. A su vez, se puede apreciar dos tipos dependiendo si el elemento de entrada y de salida tiene el mismo tipo de movimiento:

#### **1.10.1 Mecanismos de transmisión lineal**

- a. Palanca.
- b. Sistema de poleas.

#### **1.10.2 Mecanismo de transmisión circular**

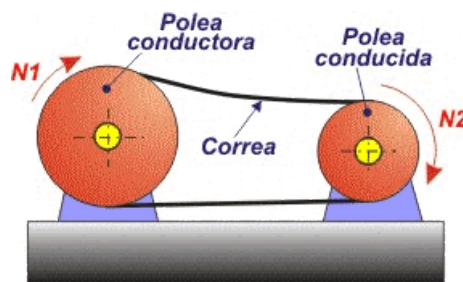
- c. Sistema de poleas con correa o banda.
- d. Sistema de engranes.
- e. Sistema de cadenas.

Dentro del diseño mecánico de la plataforma omnidireccional está contemplado el uso de actuadores de movimiento circular (motores), reduciendo así el análisis para la selección, a los mecanismos de transmisión circular.

### a. Sistema de poleas con correas o bandas

“Una polea es una rueda que tiene una ranura o acanaladura en su periferia, que gira alrededor de un eje que pasa por su centro” (Pullido, 2016).

El sistema de poleas con banda o correa consiste en dos poleas ubicadas a una determinada distancia entre sí, y que giran a su vez por efecto del rozamiento con la banda en ambas poleas. Se distingue la polea motriz que es aquella que conduce el movimiento propio del eje en donde se encuentra el actuador, también se tiene la polea conducida la cual se ajusta al eje que debe ser movido, y finalmente se encuentra la banda o correa que suele ser una cinta de cuero, caucho u otro material flexible y resistente que facilita el movimiento entre las poleas.



**Figura 22 Sistema de poleas simple**

**Fuente:** (Lupion, 2012)

Existen algunos tipos de banda según la forma de su sección transversal, entre las más conocidas se puede citar:

**Bandas redondas:** Utilizadas en transmisión de potencias bajas, su diámetro puede variar entre 3mm y 12mm, su perfil puede ser semicircular o trapezoidal y se construyen en cuero, algodón o caucho.

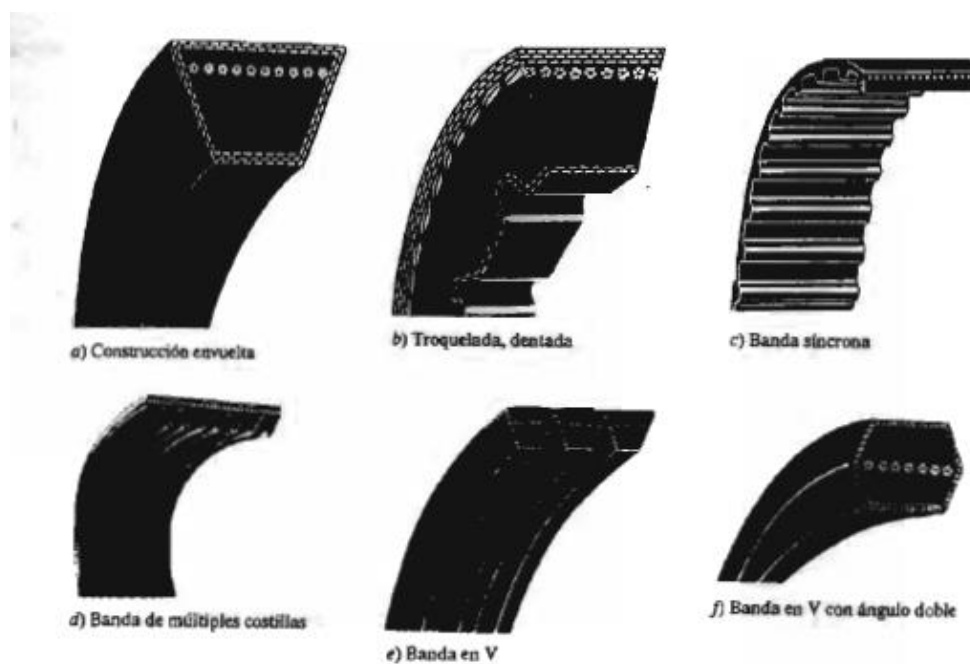
**Bandas Planas:** Utilizadas en la transmisión en donde la distancia entre centros es grande, su sección transversal tiene forma rectangular, útiles para poleas de diámetros pequeños, sin embargo, puede sufrir desplazamientos laterales, se construyen en caucho o poliamidas.

**Bandas Dentadas:** Son bandas que se fabrican con gran resistencia a altas temperaturas y al contacto con aceites y derivados del petróleo, poseen alta resistencia a la fatiga, tienen una eficiencia alta cerca del 98%, además, ofrecen una gran variedad de pasos y anchos. Proporcionan mayor flexibilidad y eficiencia a la banda en comparación con las normales.

**Bandas sincrónicas:** Usadas comúnmente en procesos que requieren movimientos sincronizados y repetitivos. Se asientan sobre poleas que tienen ranuras en su periferia, convirtiéndola en un impulsor positivo.

**Bandas Trapeciales o en V:** Son un tipo de banda muy usado, en especial para aplicaciones industriales y vehiculares.

“La forma en V hace que la banda se acúñe firmemente en la ranura, lo cual incrementa la fricción y permite la transmisión de grandes pares torsionales sin que exista deslizamiento. Se construyen con fibras naturales, sintéticas o de acero, y se encierran en un compuesto firme de hule, para dar la flexibilidad necesaria y que la banda pase alrededor de la polea” (Mott; 2006, p. 268).



**Figura 23 Tipos de bandas para transmisión**

**Fuente:** (Mott; 2006, p. 269)

A continuación se presenta un cuadro comparativo del comportamiento de los distintos tipos de bandas de transmisión.

**Tabla 2**

**Comparación del comportamiento de las bandas de transmisión**

| Críterio                          | Plana      | Trapezial   | Eslabonada | Dentada     | Poly V      | Redonda    |
|-----------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|
| Carga en los árboles              | muy grande | pequeña     | pequeña    | mínima      | grande      | muy grande |
| Trabajo a V = 25 m/s              | aceptable  | aceptable   | malo       | bueno       | aceptable   | regular    |
| Resistencia a los choques         | muy buena  | bueno       | regular    | aceptable   | muy buena   | bueno      |
| Eficiencia %                      | 97 ... 98  | 96 ... 97   | 95 ... 96  | 98 ... 99   | 96 ... 97   | 96 ... 95  |
| Longitud de correa.               | libre      | normalizada | libre      | dependiente | normalizada | libre      |
| Tolerancia a la desalineación     | pequeña    | grande      | grande     | pequeña     | pequeña     | muy grande |
| Nivel de ruido                    | muy bajo   | muy bajo    | bajo       | bajo        | bajo        | bajo       |
| Sincronismo                       | no         | no          | no         | si          | no          | no         |
| Costo inicial                     | bajo       | bajo        | bajo       | moderado    | moderado    | mínimo     |
| Necesidad de control del tensado  | alguna     | escasa      | alguna     | escasa      | alguna      | alguna     |
| Facilidad de montaje entre apoyos | si         | no          | si         | no          | no          | si         |
| Ancho reducido                    | no         | si          | si         | si          | no          | si         |
| Diámetro reducido                 | si         | no          | no         | no          | si          | no         |

Fuente: (Colcha Martha, 2010)

**b. Sistema de engranes**

Un sistema de engranajes está compuesto por el acoplamiento de ruedas dentadas que encajan entre sí, transmitiendo el movimiento circular de una rueda hacia otra siguiente.

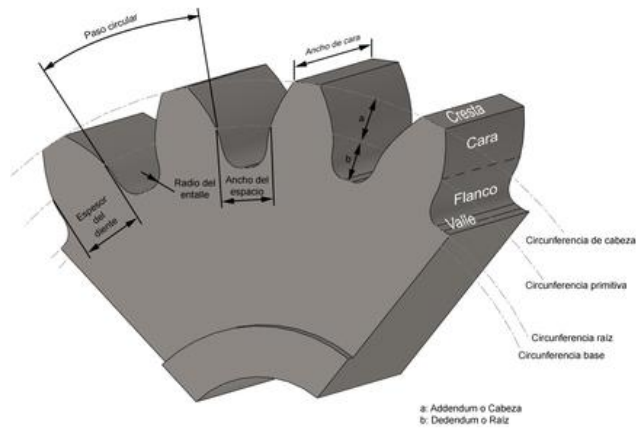
Para este tipo de transmisión se distinguen dos ruedas, una conductora o también conocida como corona que se acopla en el eje de entrada y una rueda conducida o también llamada piñón a la cual se le transmite el movimiento y es solidaria al eje de salida. Las velocidades a las que giran estas ruedas son  $n_1$  y  $n_2$  respectivamente, definiendo así a la relación de transmisión (relación entre ambas velocidades de giro) como sigue:

$$i = \frac{n_2}{n_1}$$

También es posible establecer la relación de transmisión de acuerdo al número de dientes de los engranajes, donde  $Z$  es el número de dientes que posee:

$$i = \frac{Z1}{Z2}$$

Entre los principales componentes presentes en un engranaje se aprecian los siguientes:



**Figura 24 Partes de un engranaje**

**Fuente:** (Catedu, 2013)

Una de las ventajas en los engranes es que pueden transmitir el movimiento entre ejes muy cercanos, además de grandes pares de fuerza ya que los dientes no presentan deslizamiento entre sí. Por otra parte, esta transmisión es muy útil en materiales que poseen gran dureza superficial, ya que pueden transmitir pares elevados a grandes velocidades manteniendo constante la relación de transmisión.

Dependiendo de la forma de los dientes y del engranaje, se pueden distinguir los siguientes tipos:

- **Engranajes rectos:** Se utilizan en transmisiones de ejes paralelos. Son uno de los mecanismos mayormente empleados y están presentes en cualquier tipo de máquina como por ejemplo relojes, juguetes, máquinas herramienta, etc.





**Figura 25 Engranaje recto**

**Fuente:** (Catedu, 2013)

- **Engranajes helicoidales:** Sus dientes se disponen en una trayectoria de hélices paralelas alrededor de un cilindro. La transmisión de potencia se puede realizar entre ejes que se cruzan en cualquier dirección, incluso perpendicularmente. La construcción de este tipo de engranes es más costosa y su aplicación es principalmente en cajas de cambios y cadenas cinemáticas. Es un sistema más silencioso y de marcha más suave que el anterior.



**Figura 26 Engranaje helicoidal**

**Fuente:** (Catedu, 2013)

- **Engranajes helicoidales dobles:** También conocidos como “espina de pescado”, es una combinación de hélice derecha e izquierda, deben ser capaces de absorber carga axial de tal manera que se impida cargas excesivas en el diente. El error de deslizamiento es la mitad que el del engranaje recto o helicoidal sencillo.



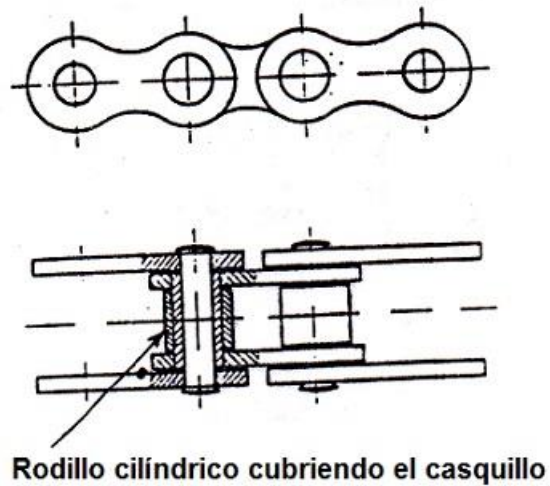
**Figura 27 Engranaje helicoidal doble**

**Fuente:** (Catedu, 2013)

### **c. Sistema de cadenas**

Es un sistema útil cuando se requiere transmitir altos pares de fuerza y los ejes de la transmisión tienen un movimiento de giro en un rango de velocidades bajas a medias. Es un medio robusto para trabajos en los que las condiciones ambientales son variantes y diversas o se encuentran a elevadas temperaturas, siempre y cuando se proporcione una adecuada lubricación. De acuerdo con la función que desarrollan se pueden clasificar en:

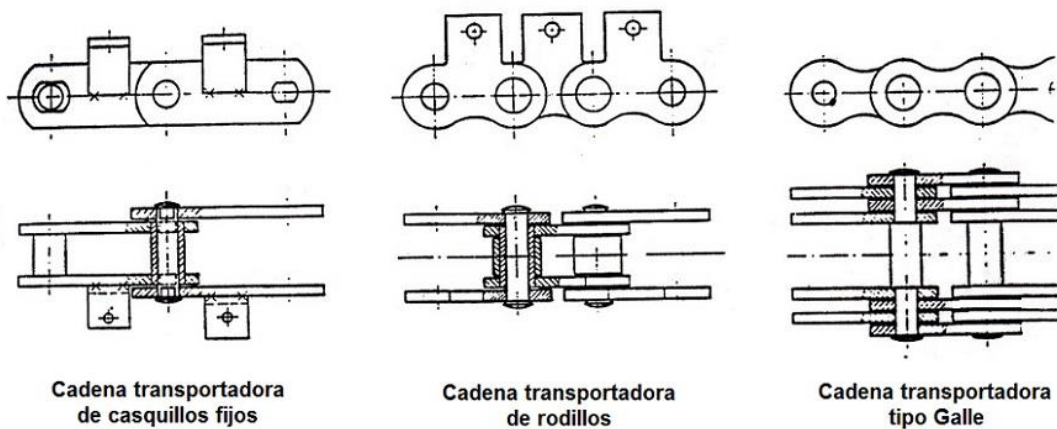
- **Cadenas de transmisión de potencia:** Su principal objetivo es la transmisión de potencia entre ejes que giran a velocidades específicas.



**Figura 28 Cadena de potencia de rodillos**

Fuente: (Ingemecánica, 2008)

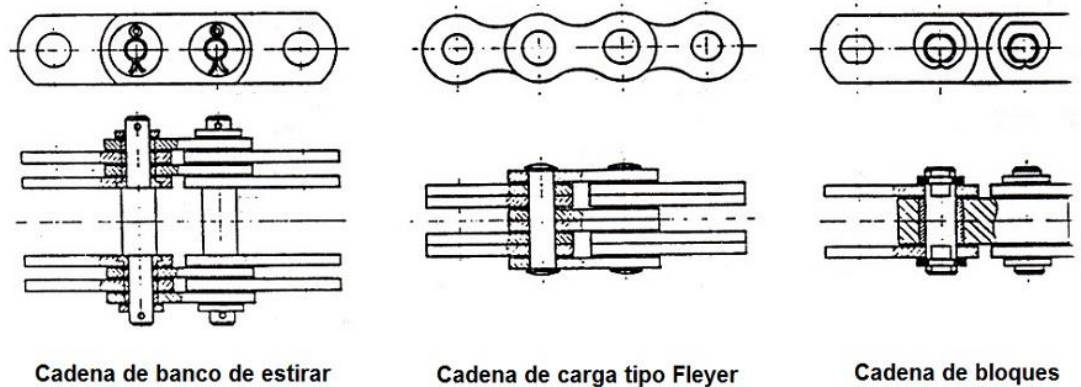
- **Cadenas de manutención:** Conocidas también como cadenas transportadoras, la ventaja de su geometría les permite realizar transporte o arrastre de material.



**Figura 29 Cadenas Transportadoras de varios tipos**

Fuente: (Ingemecánica, 2008)

- **Cadenas de carga:** Se las conoce como bancos de fuerza y este tipo de cadena puede transmitir grandes cargas, elevar grandes pesos así como accionar bancos de fuerza, de ahí su nombre.



**Figura 30 Cadenas de carga de varios tipos**

**Fuente:** (Ingemecánica, 2008)

A continuación se presenta un cuadro explicativo con las principales ventajas y desventajas de los distintos tipos de mecanismos de transmisión antes descritos:

**Tabla 3**

**Ventajas y desventajas de los mecanismos de transmisión**

| MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO |   |  |
|--|---|--|
| TIPO DE MECANISMO                        | VENTAJAS  | DESVENTAJAS  |
| POLEAS CON CORREA O BANDA                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmite el movimiento a grandes distancias.</li> <li>• Mecanismo silencioso.</li> <li>• Diseño sencillo y económico.</li> <li>• La correa puede desprenderse si el mecanismo se atasca.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocupa gran espacio.</li> <li>• A velocidades altas la correa puede patinar.</li> <li>• La potencia a transmitir es limitada.</li> <li>• Montaje no sencillo.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• A tensiones altas la correa puede salirse de la polea.</li> </ul> </li> </ul> |

**CONTINÚA**

|          |   |  |
|----------|---|--|
| ENGRANES | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Exactitud en la relación de transmisión.</li> <li>•Transmite pares de fuerza elevados a grandes velocidades.</li> <li>•Transmiten movimiento circular entre ejes muy cercanos.</li> <li>•No se deslizan.</li> <li>•Fácil mantenimiento.</li> <li>•Espacio reducido.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Costo elevado dependiendo del tipo de engrane.</li> <li>•Transmisión se produce con más ruido que por poleas.</li> </ul> |
| CADENAS  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Transmisión de grandes pares a velocidades medias y bajas.</li> <li>•Transmisión robusta.</li> <li>•Trabajo en condiciones ambientales diversas.</li> <li>•Transmisión de relación fija entre las velocidades.</li> <li>•Sistema económico.</li> <li>•Fácil montaje.</li> <li>•No presenta deslizamiento.</li> <li>•Posibilidad de varios hilos para mejor acoplamiento.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Sistema de transmisión produce ruido.</li> <li>•Requiere lubricación.</li> </ul>   |

### 1.11. Análisis de las ventajas y desventajas del uso de sistemas de transmisión por cadena

Después de analizar las ventajas y desventajas de los mecanismos de transmisión del movimiento presentados en la tabla 3, se aprecian dos opciones que pueden ser incorporadas en el diseño para la transmisión, el sistema de poleas con banda y el sistema de cadenas. Sin embargo, al considerar factores como la distancia de transmisión, la velocidad, el par, la potencia transmitida y el costo, se opta por priorizar la implementación del sistema de cadenas debido a las prestaciones que ofrece, con la posibilidad de incorporar varios hilos para un mejor acoplamiento entre mecanismos.

A pesar de que el sistema de poleas con banda es de fácil implementación, presenta un diseño sencillo y económico y resulta un mecanismo silencioso al momento de trabajar, se debe tomar en cuenta ciertos aspectos que pueden

hacer de esta alternativa una opción no tan adecuada o innecesaria. Los siguientes lineamientos han sido tomados del libro de Diseño de elementos de máquinas de Robert Mott de su cuarta edición y demuestran que muchas de las decisiones de diseño dependerán de la aplicación y de las limitaciones de espacio que se requieran.

- La mayor parte de las poleas comerciales son de hierro colado, y deben limitarse a una velocidad de banda de 6500 pies/min ( $1980 \text{ m/min} = 33 \text{ m/s}$ ).
- Se debe considerar un tipo alternativo de transmisión, como los engranes o cadena, si la velocidad de banda es menor que 1000 pies/min.

Estas dos consideraciones han sido tomadas en cuenta para la decisión de realizar el diseño del sistema de tracción en base a mecanismos por cadena, dada que la velocidad de giro requerida es de  $0.7 \text{ m/s}$ , siendo inferior a la citada anteriormente. Además, la distancia entre centros será menor a los 15cm, por lo que una de las mayores características de la transmisión por poleas no es aplicable en este caso y su diseño no sería el idóneo.

De igual manera, se requiere que el diseño mecánico sea lo más compacto posible dadas las dimensiones iniciales del proyecto base, de ser viable, realizar un redimensionamiento con el fin de obtener una estructura aún más compacta y por ende también los elementos que conformarán el sistema de transmisión.

Por consiguiente, una vez analizados todos los parámetros antes descritos, se toma la decisión de realizar el diseño mecánico en base al sistema de transmisión por cadenas, el cual ofrece la posibilidad de encontrar en el mercado una mayor variedad de tamaños y número de dientes para los piñones y catarinas. La utilización de una cadena se justifica también por la capacidad de aumentar la potencia del sistema, debido al uso de hileras múltiples.

Los lineamientos y la etapa de diseño utilizada que se presentan a continuación, han sido tomados del libro de Diseño de Elementos de Maquinas de Robert Mott de su cuarta edición, y sugieren una guía para el diseño de transmisión por cadenas.

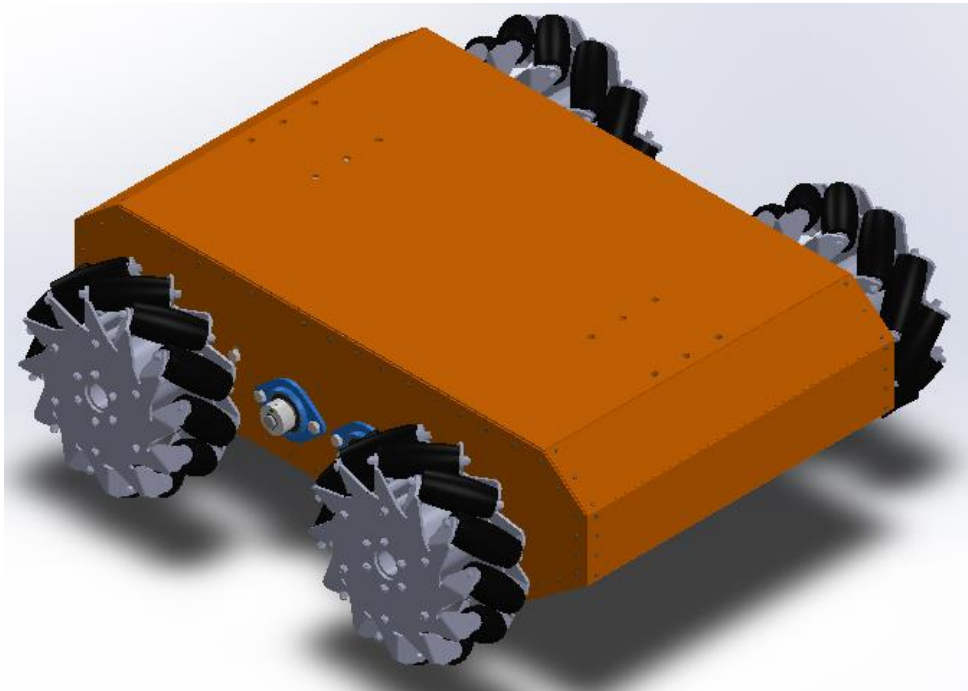
1. La cantidad mínima de dientes de una Catarina debe ser 17, a menos que el impulsor funcione a una velocidad muy pequeña, menor que 100rpm.
2. La relación máxima de velocidades debe ser 7, aunque son posibles relaciones mayores.
3. La distancia entre centros entre los ejes de catarinas debe ser de 30 a 50 pasos de cadena (30 a 50 veces el paso de la cadena).
4. En el caso normal, la Catarina mayor no debe tener más de 120 dientes.
5. La longitud de la cadena debe ser múltiplo entero del paso, y se recomienda tener un número par de pasos.

## CAPÍTULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL

#### 2.1 Diseño mecánico de la plataforma omnidireccional

Se toma como modelo de referencia el diseño mecánico de la plataforma robótica del proyecto base. A continuación se observa en la figura 31 el diseño final de la estructura para la plataforma omnidireccional.



**Figura 31** Diseño mecánico de la plataforma omnidireccional

#### 2.2 Parámetros de diseño

La carga que puede soportar la plataforma omnidireccional se establece en relación con la carga soportada por cada rueda cuyo valor es 37.5 kg (Anexo A), es decir, que la máxima carga total puede llegar hasta 150 kg por lo que se asume como valor para el diseño 100 kg, con lo que se tiene.



$m_{diseño}$ : masa de diseño = 100 kg

$W_{diseño}$ : peso de diseño = 981 N

El peso de la plataforma omnidireccional viene dado por el peso de cada elemento que interviene en su implementación.

$W_p$ : peso plataforma = 32 kg

Los brazos robóticos montados sobre la plataforma se encuentran diseñados y contruidos, por lo que su peso es considerado para el diseño.

$W_b$ : peso brazo = 405 kg (2 brazos = 9 kg)

Los gripper van incorporados al final de cada brazo y son los encargados de sujetar la carga a transportar.

$W_{gr}$ : peso gripper = 0.5 (2 gripper = 1 kg)

La carga es el elemento o conjunto de elementos que van a ser movidos por la plataforma y reposan sobre los gripper de cada brazo robótico.

$W_l$ : peso carga = 1 kg

$W_{sf}$ : peso sensor de fuerza = 0.5 kg (2 sensores = 1 kg)

La velocidad lineal máxima a la cual la plataforma se desplaza.

$\vec{V}_{requerida}$ : velocidad requerida = 0.60 m/s

La plataforma contará con 4 ruedas omnidireccionales alimentadas con un motor cada una.

## 2.2.1 Cargas de Diseño

### a. Factor de carga

Este factor asegura que el diseño soporte cargas que no fueron consideradas o cargas que se puedan presentar por cualquier circunstancia ajena a las que ya fueron asumidas. El valor es consideración del diseñador y se tomará como porcentaje de imprevistos el 10%.

### b. Comprobación para el peso de diseño

$$W_C = W_b + W_{gr} + W_l + W_{sf}$$

**Ec. 2.1.**

$$W_c = 9kg + 1kg + 1kg + 1kg = 12kg$$

$$W_{TOTAL} = W_p + W_c \quad \text{Ec. 2.2.}$$

$$W_{TOTAL} = 32 kg + 12 kg = 44 kg$$

El peso de diseño calculado viene dado por la suma del peso total a soportar más el peso total de los elementos que se consideran como carga adicional a la plataforma por el factor de carga establecido.

$$W_d = W_T + W_c * f_{carga} \quad \text{Ec. 2.3.}$$

$$W_d = 44 kg + 12 kg * 0.1 = 45.2 kg \approx 45 kg$$

$$W_d = 45 kg * 9.81 \frac{m}{s^2} = 441.45 N \approx 442 N$$

A continuación se comprueba que el peso de diseño calculado no supere el peso de diseño propuesto.

$$W_d \leq W_{diseño}$$

$$442 N \leq 981 N \therefore \text{Si cumple}$$

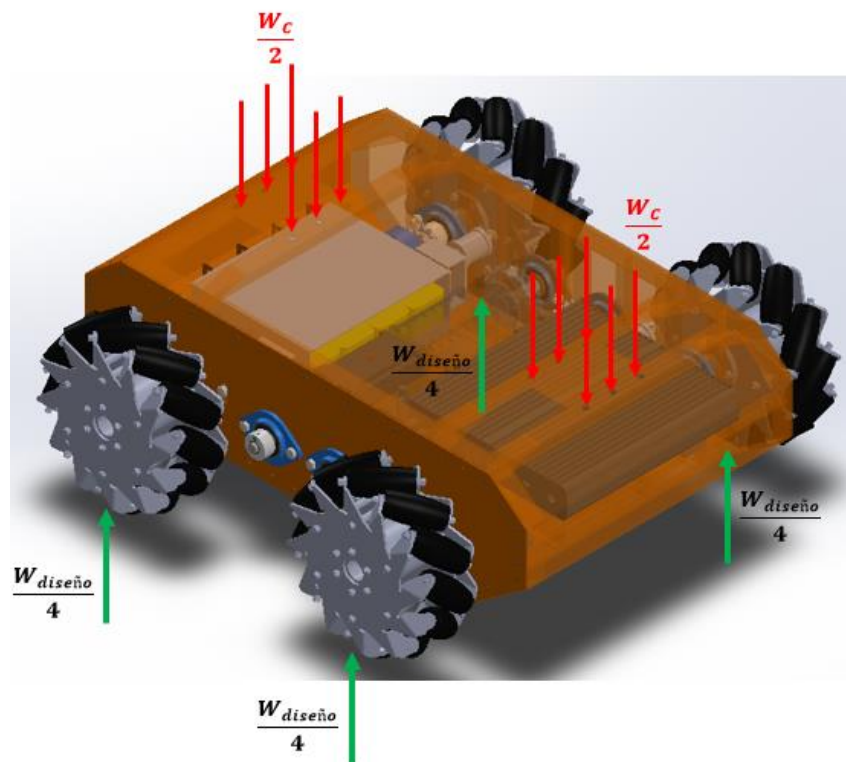


Figura 32 Representación de cargas en la plataforma omnidireccional

### c. Fuerza de rozamiento estática y dinámica

$\mu_s$ : Coeficiente de fricción estático = 1.0 (Anexo B)

$\mu_k$ : Coeficiente de fricción dinámico = 0.80 (Anexo B)

$$F_{rs} = \mu_s * W_{diseño} \quad \text{Ec. 2.4.}$$

$$F_{rk} = \mu_k * W_{diseño} \quad \text{Ec. 2.5.}$$

Reemplazando en la Ecuación 2.4. y 2.5. respectivamente, se tiene

$$F_{rs} = \mu_s * W_{diseño} = 1.0 * 981 \text{ N} = 981 \text{ N}$$

$$F_{rk} = \mu_k * W_{diseño} = 0.80 * 981 \text{ N} = 784.80 \text{ N}$$

### d. Torque total

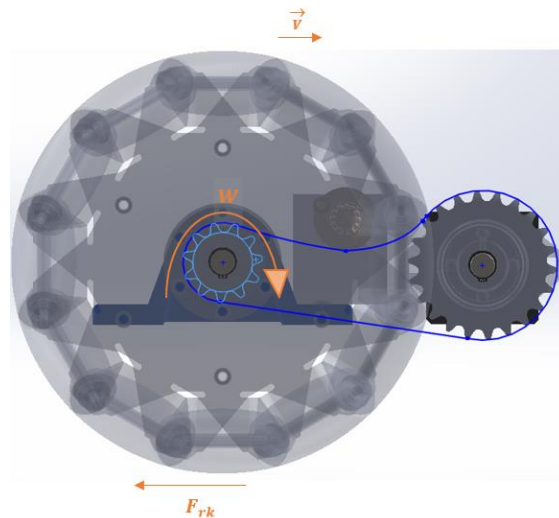


Figura 33 Sistema de transmisión por cadena de la plataforma

$$T = F_{rk} * \frac{\phi_{llanta}}{2} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

$$T = 784.80 \text{ N} * \frac{0.2032 \text{ m}}{2} = 79.75 \text{ Nm}$$

En dónde el torque en cada rueda viene dado por

$$T_{rueda} = \frac{T}{4} = \frac{79.75 \text{ Nm}}{4} = 19.95 \text{ Nm}$$

**e. Potencia requerida**

$$P = T_{rueda} * \omega_{requerida} \quad \text{Ec. 2.7.}$$

$$\omega_{requerida} = \frac{\vec{v}_{requerida}}{R_{llanta}} \quad \text{Ec. 2.8.}$$

Reemplazando los valores en la Ecuación 2.8. se tiene

$$\omega_{requerida} = \frac{0.60 \text{ m/s}}{0.1016 \text{ m}} = 5.91 \text{ rad/s}$$

Reemplazando la velocidad angular en la Ecuación 2.7. se tiene

$$P = 19.95 \text{ Nm} * 5.91 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 117.81 \text{ W} = 0.16 \text{ HP}$$

El motor que se requiere para el diseño debe entregar una potencia mínima de 118 W. Dentro del mercado se encontró el motor Dynamixel Pro H54-200-S500 cuyas prestaciones satisfacen los requerimientos calculados, siendo la potencia que entrega de 200W, valor que se encuentra por encima del estimado. Además, los Actuadores de Robot DYNAMIXEL PRO son accionados por red, lo que significa que cada uno puede ser dirigido con una identificación única. Este ID se puede configurar de forma dinámica, facilitando a los usuarios la configuración de sus actuadores para su robot específico.

Cada DYNAMIXEL PRO tiene un microcontrolador incorporado que maneja toda la comunicación y los cálculos necesarios para hacer que el servo funcione de la manera más eficiente posible. El microcontrolador puede monitorizar el motor y apagarlo si se sobrepasan determinados parámetros (temperatura demasiado alta, tensión demasiado alta / baja, demasiado par, etc.).

Por estas razones el motor DYNAMIXEL PRO H54-200-S500 es una excelente alternativa de selección para el diseño de la plataforma omnidireccional (Anexo C).

$$\omega_{motor} = 27.9 = 2.92 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

## f. Potencia de operación de los motores

De la Ecuación 2.7. se puede relacionar los datos del motor como sigue

$$P_{M1} = \omega_{motor} * T_{motor}$$

$$P_{M1} = 2.92 \frac{rad}{s} * 44.2 N * m = 129.15 W$$

$$P_{total} = 4 * P_{M1} = 4 * 129.2 W = 516.80 W$$

### 2.2.2 Cálculo del diámetro de la llanta

$$R_{llanta} = \frac{\vec{V}_{requerida}}{\omega_{motor}} \quad \text{Ec. 2.9.}$$

Despejando en la Ecuación 2.9. se tiene

$$\phi_{req} = \frac{2 * \vec{V}_{requerida}}{\omega_{motor}}$$

$$\phi_{req} = \frac{2 * 0.60 m/s}{2.92 rad/s} = 0.41 m$$

Para alcanzar la velocidad requerida acoplando directamente el motor a la llanta se requiere de un diámetro muy grande de la misma, por lo tanto, es necesario realizar una etapa de transmisión del movimiento para aumentar la velocidad y cumplir con el requerimiento.

Las ruedas omnidireccionales disponibles en el mercado que se ajustan al tamaño de la plataforma bajo el requerimiento de un diseño compacto tienen un diámetro de 8 pulgadas, especificaciones que se encuentran en el Anexo A.

## 2.3 Diseño del sistema de transmisión

### 2.3.1 Potencia transmitida

De la Ecuación 2.7. se tiene

$$P_{transmitida} = T_{motor} * \omega_{motor}$$

$$P_{transmitida} = (44.2 N * m) \left( 2.92 \frac{rad}{s} \right) = 129.06 W \approx 130 W = 0.174 HP$$

### 2.3.2 Potencia de diseño

$$P_d = P_{transmitida} * FS \quad \text{Ec. 2.10.}$$

Dónde;

FS: Factor de servicio (Anexo D)

El valor del factor de servicio para un tipo de impulsor de motor eléctrico y tipo de carga uniforme es de 1, por lo tanto, reemplazando en la Ecuación 2.10. se tiene

$$P_d = 0.174 \text{ hp} * 1 = 0.174 \text{ hp}$$

### 2.3.3 Relación de transmisión

$$i = \frac{\phi_{req}}{\phi_{llanta}} \quad \text{Ec. 2.11.}$$

$$i = \frac{0.41 \text{ m}}{0.2032 \text{ m}} = 2.02 \approx 2$$

### 2.3.4 Selección del tipo de cadena, piñón y catarina

Para una potencia transmitida de 0.174hp y una velocidad del piñón de 30rpm se tiene la opción de elegir una cadena RS35 de una o dos hileras, sin embargo, considerando el requerimiento de un diseño compacto la cadena de 2 hileras es la elección más adecuada debido a la posibilidad de tener un piñón de menor diámetro y menor número de dientes (Anexo F).

A continuación se identifica la potencia máxima a transmitir (Anexo G), se define el menor número de dientes que se disponga, para el caso un piñón de 11 dientes a una velocidad máxima de 50 rpm, se tiene.

Para cadena RS35-2 a 50 rpm

paso = 3/8 in

$P_d = 0.16 \text{ hp}$

Lubricación: Tipo A, manual o por goteo (Anexo H)

Al ser una cadena de doble hilera la capacidad de potencia aumenta, por lo que se debe multiplicar la potencia obtenida por el factor de múltiples hileras.

FMS = 1.7 (Anexo I)

$$P_d = 0.16 \text{ hp} * 1.7 = 0.272 \text{ hp}$$

### 2.3.5 Cálculo del número de dientes de la catarina

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad \text{Ec. 2.12.}$$

Despejando  $Z_2$  de la Ecuación 2.12. se tiene

$$Z_2 = i * Z_1$$

$$Z_2 = 2 * 11 \text{dientes} = 22 \text{ dientes}$$

Dónde;

$Z_1$ : Número de dientes del piñón

$Z_2$ : Número de dientes de la catarina

Una vez determinados los números de dientes necesarios para el piñón y la catarina se refiere al Anexo J para verificar si los diámetros satisfacen las limitaciones de espacio.

Para cadena RS35-2,  $p = 3/8$  in se tienen los siguientes valores

$$Z_1 = 11 \text{ dientes}$$

$$\varnothing_{p1} = 1.331 \text{ in} = 33.81 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{ext1} = 1.502 \text{ in} = 38.15 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 22 \text{ dientes}$$

$$\varnothing_{p2} = 2.635 \text{ in} = 66.93 \text{ mm}$$

$$\phi_{ext2} = 2.833 \text{ in} = 71.96 \text{ mm}$$

Dónde;

$\phi_{p1}$ : Diámetro de paso del piñón

$\phi_{p2}$ : Diámetro de paso de la catarina

$\phi_{ext1}$ : Diámetro exterior del piñón

$\phi_{ext2}$ : Diámetro exterior de la catarina

### 2.3.6 Diámetros de paso mediante fórmula

Para el piñón con  $Z_1 = 11$  dientes

$$\phi_{p1} = \frac{p}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n_1}\right)} \quad \text{Ec. 2.13.}$$

$$\phi_{p1} = \frac{\frac{3}{8} \text{ in}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{11}\right)} = 1.331 \text{ in}$$

Para la catarina con  $Z_2 = 22$  dientes

$$\phi_{p2} = \frac{p}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n_2}\right)} \quad \text{Ec. 2.14.}$$

$$\phi_{p2} = \frac{\frac{3}{8} \text{ in}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{22}\right)} = 2.635 \text{ in}$$

Se observa que los diámetros de paso definidos mediante tabla son los mismos que se calcularon por fórmula. En cuanto a la limitación de espacio la altura de la plataforma es de 160mm, el perfil sobre el cual se colocarán las chumaceras se encuentran a 26.9 mm de la base, la distancia de ésta última al centro del apoyo para el eje en la chumacera es de 33mm por lo que aproximadamente el espacio sobrante es de 100mm. El mayor diámetro de la catarina es de 72mm, su radio ocupará alrededor de 36mm por encima de la



chumacera, quedando un espacio libre cerca de 60mm con lo que satisfacen limitaciones de espacio para un diseño compacto.

### 2.3.7 Longitud de pasos

Se debe especificar una distancia entre centros nominal C. Para el caso se asume el valor de 15 pasos por limitaciones de espacio.

$$L = 2C + \frac{Z_2 + Z_1}{2} + \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{4\pi^2 C} \quad (\text{Mott, 2006}) \quad \text{Ec. 2.15.}$$

$$L = 2 * 15 + \frac{22 + 11}{2} + \frac{(22 - 11)^2}{4\pi^2 * 15} = 46.704 \text{ pasos}$$

Se debe especificar un número par de pasos, L = 46 pasos.

### 2.3.8 Distancia teórica entre centros

$$C = \frac{1}{4} \left[ L - \frac{Z_2 + Z_1}{2} + \sqrt{\left[ L - \frac{Z_2 + Z_1}{2} \right]^2 - \frac{8(Z_2 - Z_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad (\text{Mott, 2006}) \quad \text{Ec. 2.16.}$$

$$C = \frac{1}{4} \left[ 46 - \frac{22 + 11}{2} + \sqrt{\left[ 46 - \frac{22 + 11}{2} \right]^2 - \frac{8(22 - 11)^2}{4\pi^2}} \right] = 14.65 \text{ pasos}$$

$$C = 14.65 \text{ pasos} * \frac{3}{8} \text{ in} = 5.494 \text{ in} = 139.54 \text{ mm}$$

### 2.3.9 Ángulo de contacto de la cadena

El ángulo de contacto mínimo debe ser de 120 grados.

$$\theta_1 = 180^\circ - 2\sin^{-1} \left[ \frac{\phi_{p2} - \phi_{p1}}{2C} \right] \quad (\text{Mott, 2006}) \quad \text{Ec. 2.17.}$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2\sin^{-1} \left[ \frac{2.635 - 1.331}{2 * 5.287} \right] = 165.83^\circ$$

$$165.83^\circ > 120^\circ \therefore \text{si cumple}$$

$$\theta_2 = 180^\circ + 2\sin^{-1} \left[ \frac{\phi_{p2} - \phi_{p1}}{2C} \right] \quad \text{Ec. 2.18.}$$

$$\theta_2 = 180^\circ + 2\sin^{-1} \left[ \frac{2.635 - 1.331}{2 * 5.287} \right] = 194.16^\circ$$

$$194.16^\circ > 120^\circ \therefore \text{si cumple}$$

Dónde;

$\theta_1$ : Ángulo de contacto de la cadena con el piñón

$\theta_2$ : Ángulo de contacto de la cadena con la catarina

### 2.3.10 Tensión de la cadena

$$F_{\text{tensión}} = \frac{T_{\text{rueda}}}{\frac{\theta_{p1}}{2}} \quad \text{Ec. 2.19.}$$

$$F_{\text{tensión}} = \frac{19.95 \text{ Nm}}{0.0165 \text{ m}} = 1209.09 \text{ N}$$

### 2.3.11 Velocidad de la cadena

$$V_{\text{cadena}} = \frac{p * Z_1 * n}{1000} \left[ \frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad \text{Ec. 2.20.}$$

$$V_{\text{cadena}} = \frac{9.53 \text{ mm} * 11 \text{ dientes} * 60 \text{ rpm}}{1000} = 6.28 \left[ \frac{\text{m}}{\text{min}} \right] = 20.60 \text{ ft/min}$$

Dónde;

p: paso de la cadena en [mm]

n: Velocidad de salida en [rpm]

### 2.3.12 Verificación de la máxima carga permitida

Para una velocidad de cadena menor a 50 m/min propuesta en el manual de Tsubaki Drive Chains, se debe verificar la máxima carga permisible.

$$F_{\text{tensión}} * FS * CS \leq \text{Máxima carga admisible} \quad \text{Ec. 2.21.}$$

Para una velocidad de cadena menor a 50 ft/min el coeficiente de velocidad de la cadena  $CS = 1$  (Anexo K).

De la Ecuación 2.21. reemplazando el valor de CS, se tiene

$$1209.09 \text{ N} * 1 * 1 = 1224.85 \text{ N}$$

Para una cadena de doble hilo RS35 la máxima carga admisible (Anexo L), se tiene

$$W_a = 810 \text{ lb} = 3603.06 \text{ N}$$

De la Ecuación 2.21. se verifica

$$1209.09 \text{ N} \leq 3603.03 \text{ N} \therefore \text{si cumple}$$

### 2.3.13 Velocidad lineal real

De la Ecuación 2.12. se pueden relacionar las velocidades angulares como sigue

$$\omega_{salida} = \omega_{motor} * R = 27.9 \text{ rpm} * 2 = 55.80 \text{ rpm} = 5.84 \text{ rad/s}$$

De la Ecuación 2.9. se verifica

$$V_{real} = \frac{\omega_{salida} * \phi_{llanta}}{2} = \frac{5.84 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 0.2032 \text{ m}}{2} = 0.59 \text{ m/s}$$

### 2.3.14 Potencia real

$$P_{real} = \frac{F_{rk}}{4} * V_{real} \quad \text{Ec. 2.22.}$$

$$P_{real} = \frac{784.88 \text{ N}}{4} * 0.59 \text{ m/s} = 115.77 \text{ W}$$

$$P_{real} < P_{motor}$$

$$115.77 \text{ W} < 200 \text{ W} \therefore \text{Si cumple}$$

### 2.3.15 Velocidad angular real

De la Ecuación 1.9.3 se puede expresar la siguiente matriz

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -\frac{1}{b+d} & \frac{1}{b+d} & -\frac{1}{b+d} & \frac{1}{b+d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.23.}$$

$$\omega_{\max rueda} = 5.84 \frac{rad}{s}$$

$$R = 0.1016m$$

$$b = 0.255m$$

$$d = 0.17m$$

Resolviendo la matriz de la ecuación 2.23. se encuentra la expresión que representa la velocidad angular del conjunto

$$\omega = \frac{R}{4} \left\{ -\frac{\dot{\phi}_1}{b+d} + \frac{\dot{\phi}_2}{b+d} - \frac{\dot{\phi}_3}{b+d} + \frac{\dot{\phi}_4}{b+d} \right\}$$

$$\omega = \frac{0.1016m}{4} \left\{ - \left( -\frac{5.84 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right) + \frac{5.84 \frac{rad}{s}}{0.425m} - \left( -\frac{5.84 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right) + \frac{5.84 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right\}$$

$$\omega = 1.396 \frac{rad}{s}$$

## 2.4 Diseño de ejes

### 2.4.1 Eje de la rueda

Material: Aluminio 2024-T4 (Anexo M)

$$S_y = 324 \text{ MPa}$$

$$S_u = 469 \text{ MPa}$$

$$F_s = 2.5$$

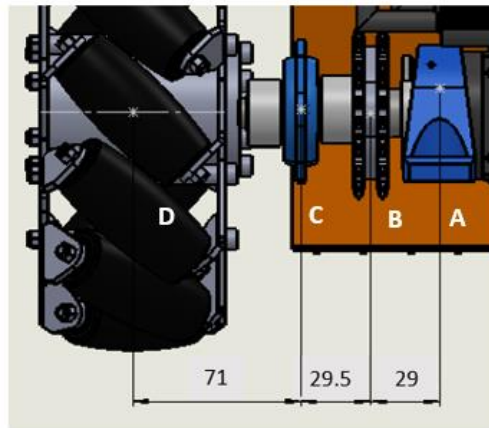


Figura 34 Distancia entre apoyos

a. Peso en cada rueda

$$W_{rueda} = \frac{W_{diseño}}{4} \quad \text{Ec. 2.23.}$$

$$W_{rueda} = \frac{981 N}{4} = 245.25 N$$

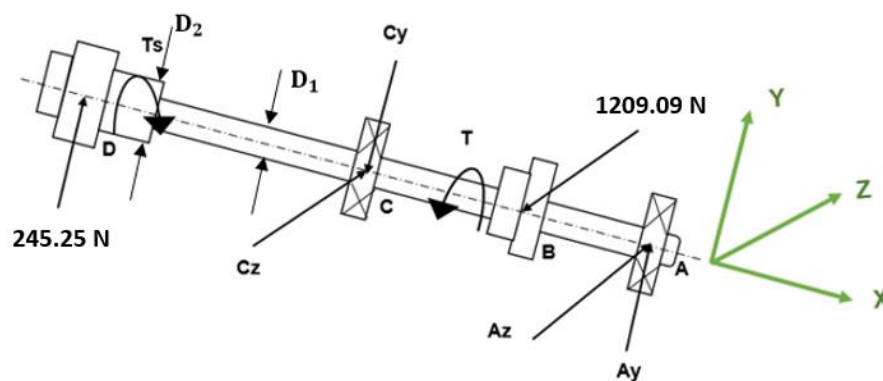


Figura 35 Diagrama de fuerzas en el eje de la rueda

Sumatoria de fuerzas

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - C_y + 245.25 N = 0$$

Ec. 2.24.

$$\sum F_z = 0$$

$$C_z + A_z - 1209.09 \text{ N} = 0$$

**Ec. 2.25.**

### Sumatoria de momentos

$$\sum M_{Ay} = 0$$

$$1209.09 \text{ N} (0.029 \text{ m}) - C_z(0.0585 \text{ m}) = 0$$

**Ec. 2.26.**

$$C_z = 599.38 \text{ N}$$

$$\sum M_{Az} = 0$$

$$C_y(0.0585 \text{ m}) - 245.25 \text{ N} (0.1295 \text{ m}) = 0$$

**Ec. 2.27.**

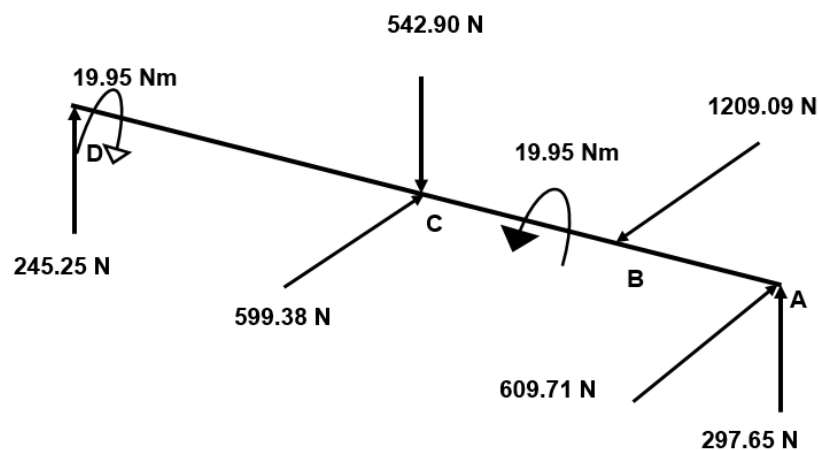
$$C_y = 542.90 \text{ N}$$

Reemplazando  $C_y$  en la Ecuación 2.24. se encuentra el valor de  $A_y$

$$A_y = C_y - 245.25 \text{ N} = 542.90 \text{ N} - 245.25 \text{ N} = 297.65 \text{ N}$$

Reemplazando  $C_z$  en la Ecuación 2.25. se encuentra el valor de  $A_z$

$$A_z = 1209.09 \text{ N} - C_z = 1209.09 \text{ N} - 599.38 \text{ N} = 609.71 \text{ N}$$



**Figura 36 Representación de fuerzas en el eje**

b. Diagrama de carga en el eje Y-X

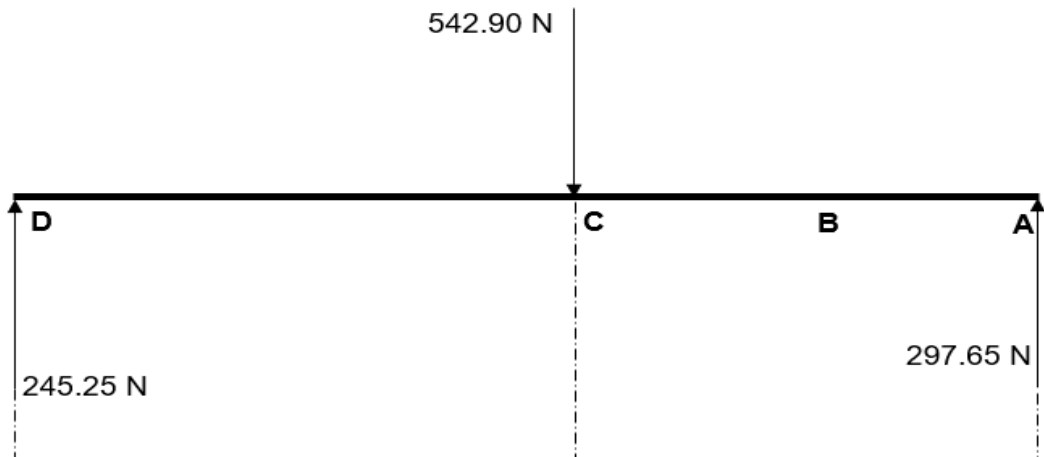


Figura 37 Diagrama de cargas

c. Diagrama de fuerza cortante

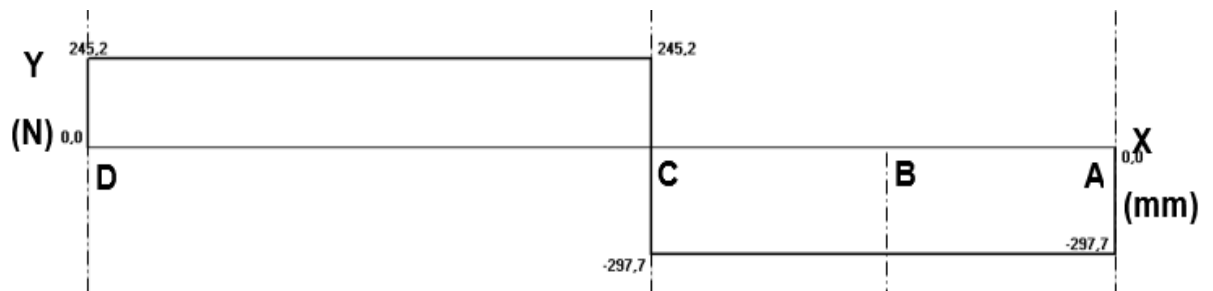


Figura 38 Diagrama de fuerza cortante

d. Diagrama de momento flexionante

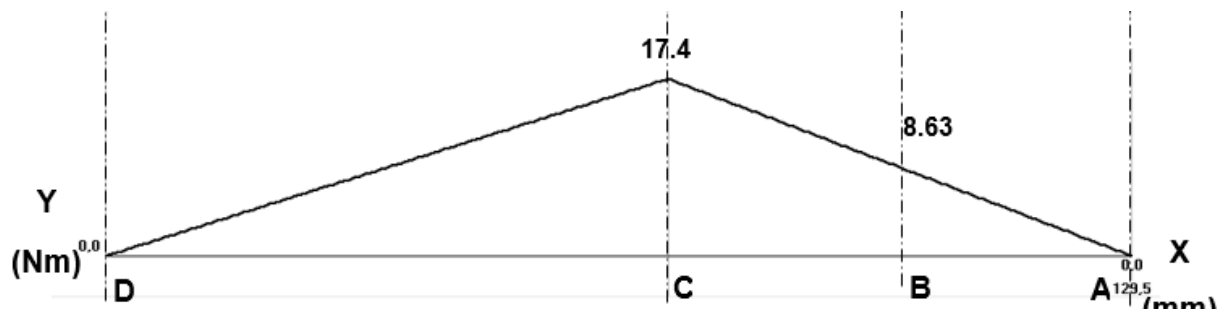


Figura 39 Diagrama de momento flexionante

e. Diagrama de carga en el eje Z-X

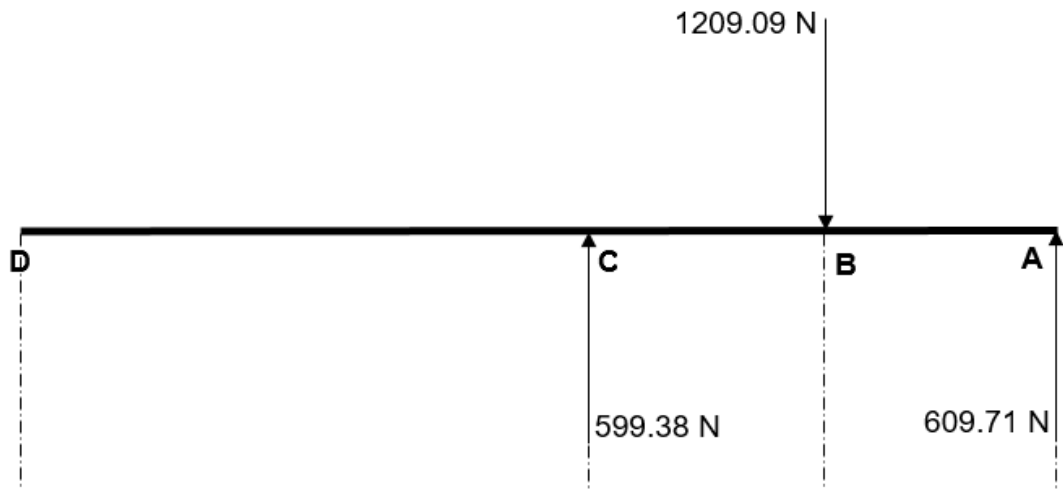


Figura 40 Diagrama de carga

f. Diagrama de fuerza cortante

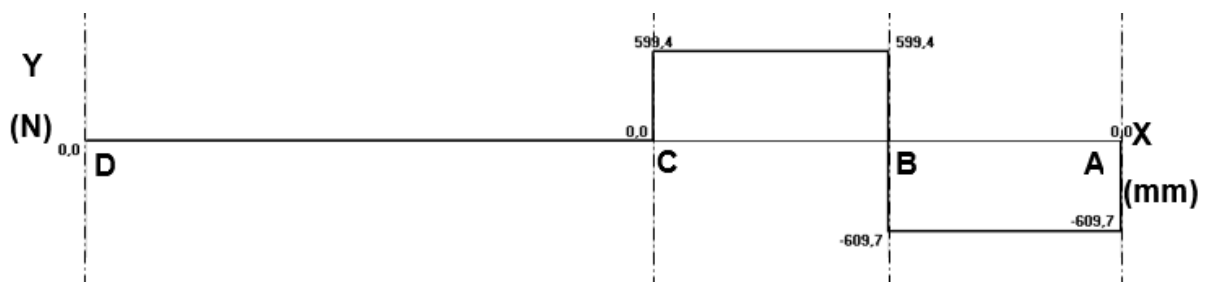


Figura 41 Diagrama de fuerza cortante

g. Diagrama de momento flexionante

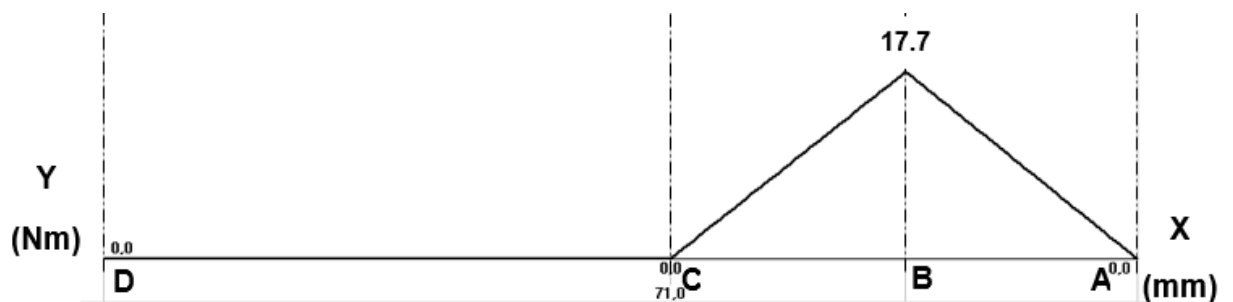


Figura 42 Diagrama de momento flexionante



Como se puede apreciar en los diagramas de momento flexionante el mayor momento se encuentra en el punto B, por tanto se tiene

$$M_B = \sqrt{M_{Bmax}^2 + M_{Bmin}^2} \quad \text{Ec. 2.28.}$$

$$M_B = \sqrt{17.70^2 + 8.63^2} = 19.69 \text{ Nm}$$

### Cálculo de momento en el punto D

$$M_D = 0 \text{ Nm}$$

### Cálculo del diámetro en el punto B

Para una sección de diámetro uniforme  $K_t = 1$

$$D_B = \left[ \left( \frac{32 * F_s}{\pi * S_y} \right) * \left( M_B^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3} \quad \text{Ec. 2.29.}$$

$$D_B = \left[ \left( \frac{32 * 2.5}{\pi * 324 * 10^6 \text{ Pa}} \right) * \left( (19.69 \text{ Nm})^2 + \frac{3}{4} (19.95 \text{ Nm})^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_B = 0.0127 \text{ m} = 12.70 \text{ mm}$$

### Cálculo del diámetro en el punto D

$$D_D = \left[ \left( \frac{32 * F_s}{\pi * S_y} \right) * \left( M_D^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_D = \left[ \left( \frac{32 * 2.5}{\pi * 324 * 10^6 \text{ Pa}} \right) * \left( (0 \text{ Nm})^2 + \frac{3}{4} (19.95 \text{ Nm})^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_D = 0.01107 \text{ m} = 11.07 \text{ mm}$$

Se observa que en el punto B donde ocurre el mayor momento el diámetro calculado para el eje es de 12.70 mm, mientras que en el cambio de sección del punto D el diámetro calculado es de 11.07mm.

El eje tendrá un diámetro uniforme para los puntos A, B y C, dado que el punto crítico fue en B predomina el valor del diámetro encontrado, estandarizando dicho valor se selecciona un eje con  $\varnothing = 1/2" = 12.70 \text{ mm}$  con lo que cumple el requerimiento de diseño. En cuanto al diámetro del eje en el

punto D se toma como valor el diámetro interior de la rueda  $\varnothing = 2/3" = 16.90 \text{ mm}$  con lo que supera el valor calculado y cumple con el diseño.

#### **h. Selección del rodamiento**

Para la selección de los rodamientos se toma en cuenta las cargas presentadas en la sección anterior, además, el diámetro del eje y la carga dinámica que soporta el rodamiento, la cual puede ser verificada en el catálogo del Anexo N.

#### **Rodamiento en el punto A**

El rodamiento que se va a utilizar es un rodamiento con soporte debido a que estará asentado sobre un perfil en U y soportando el extremo del eje de la rueda.

$$L_{10h} = 8000 \text{ h (Anexo O)}$$

El valor para la duración de diseño se expresa en la siguiente ecuación

$$L_d = L_{10h} * rpm * 60 \text{ min/h} \quad \text{Ec. 2.30.}$$

$$L_d = 8000h * 55.80 \text{ rpm} * 60 \text{ min/h}$$

$$L_d = 2.67 * 10^7 \text{ rev}$$

$$C_r = F_d * \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{Ec. 2.31.}$$

$$F_d = V * R \quad \text{Ec. 2.32.}$$

El valor de  $V=1$  debido a que la pista interior del rodamiento es la que gira (Mott, 2006, pág. 613). Reemplazando  $V$  en la Ecuación 2.32. se encuentra el valor de la carga de diseño

$$F_d = 1 * 609.71 \text{ N} = 609.71 \text{ N}$$

Según el libro (Mott, 2006, pág. 611) para rodamiento de bolas la carga equivalente sobre el rodamiento es  $k=3$ , teniendo así el valor de carga dinámica de la Ecuación 2.31.

$$C_r = 609.71 N * \left( \frac{2.67 * 10^7 rev}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_r = 1822.33 N$$

Para un valor de carga dinámica de 1822.33 N y un diámetro estándar de ½" se encontró en el catálogo FAG (Anexo N) el rodamiento de la serie UC201-08, siendo un rodamiento insertable con tornillos prisioneros en el anillo interior el cual satisface las condiciones de diseño.

### Rodamiento en el punto C

El rodamiento que se va a utilizar es un rodamiento de pared debido a que se ubicará en la tapa lateral de la estructura soportando el eje de la rueda.

De la Ecuación 2.30. se tiene

$$L_d = 8000 * 55.80 rpm * 60 min/h$$

$$L_d = 2.67 * 10^7 rev$$

De la Ecuación 2.32.

$$F_d = V * R$$

El valor de V=1 debido a que la pista interior del rodamiento es la que gira.

$$F_d = 1 * 599.38 N = 599.38 N$$

De la Ecuación 2.31.

$$C_r = F_d * \left( \frac{L_d}{10^6} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$C_r = 599.38 N * \left( \frac{2.67 * 10^7 rev}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_r = 1791.46 N$$

Para un valor de carga dinámica de 1791.46 N y un diámetro estándar de ½" se encontró en el catálogo FAG (Anexo P) el rodamiento de la serie

SBPFL201-08, siendo un rodamiento de pared con tornillos prisioneros en el anillo interior el cual satisface las condiciones de diseño.

### 2.4.2 Eje del motor

Aluminio 7075-T6 (Anexo M)

$$S_y = 503 \text{ MPa}$$

$$S_u = 572 \text{ MPa}$$

$$F_s = 2.5$$

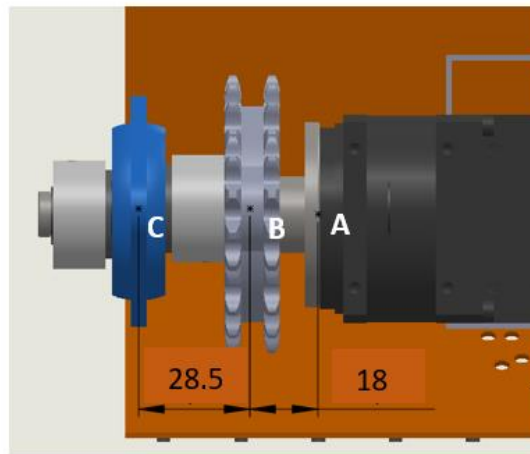


Figura 43 Distancia entre apoyos

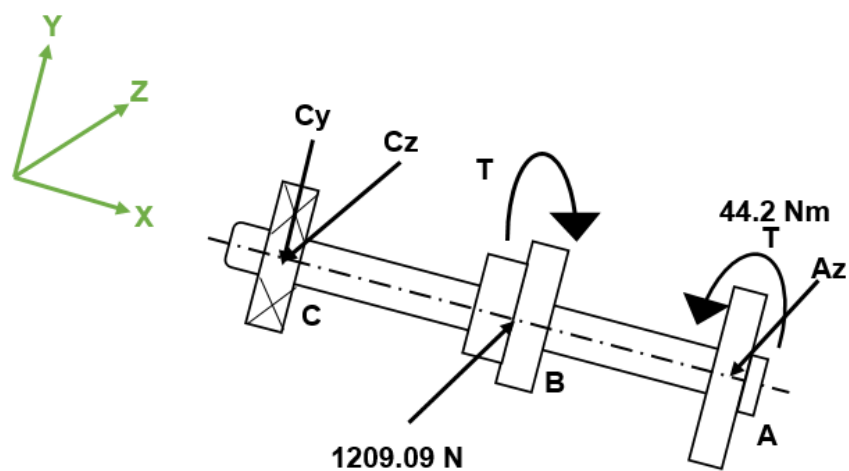


Figura 44 Diagrama de fuerzas

**Sumatoria de fuerzas**

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y = 0$$

**Ec. 2.33.**

$$\sum F_z = 0$$

$$1209.09 \text{ N} - C_z - A_z = 0$$

**Ec. 2.34.****Sumatoria de momentos**

$$\sum M_{yA} = 0$$

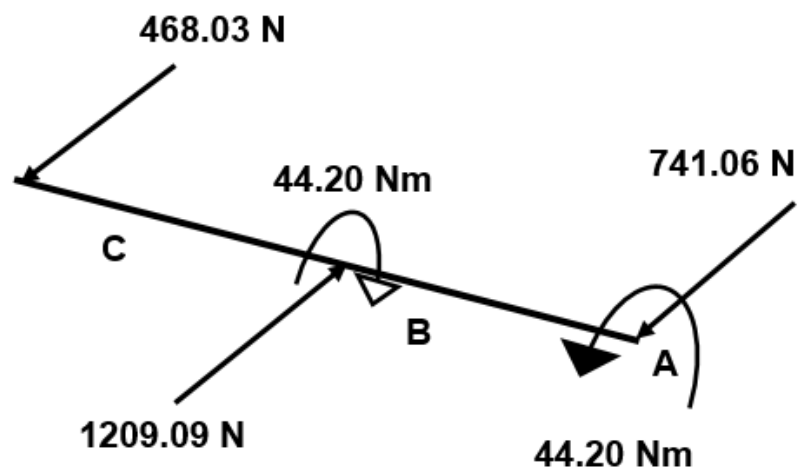
$$C_z(0.0465 \text{ m}) - 1209.09 \text{ N}(0.018 \text{ m}) = 0$$

**Ec. 2.35.**

$$C_z = 468.03 \text{ N}$$

Reemplazando  $C_z$  en la Ecuación 2.34. se encuentra el valor de  $A_z$

$$A_z = 1209.09 \text{ N} - C_z = 1209.09 \text{ N} - 468.03 \text{ N} = 741.06 \text{ N}$$



**Figura 45 Representación de esfuerzos**

a. Diagrama de carga en el eje Z-X

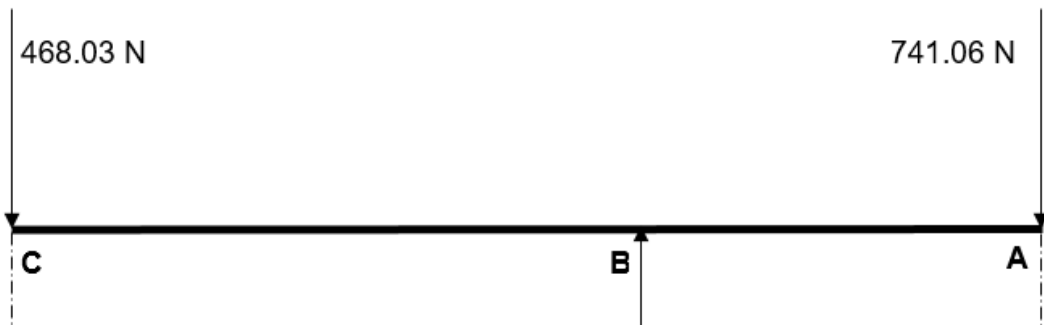


Figura 46 Diagrama de carga

b. Diagrama de fuerza cortante

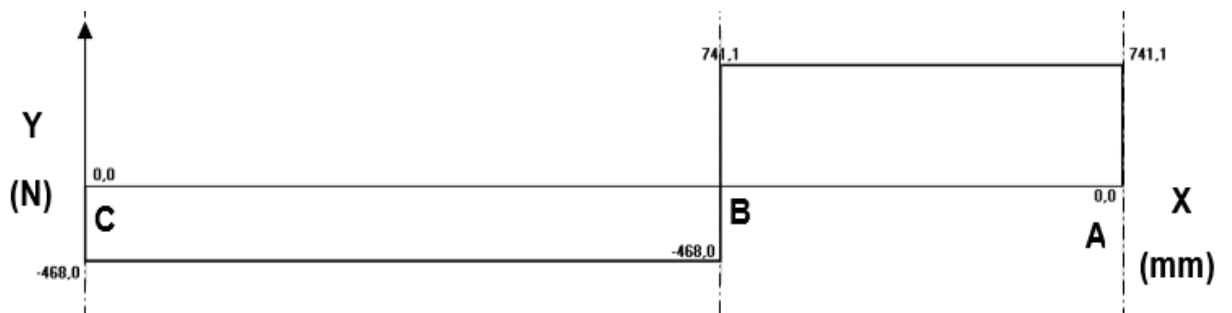


Figura 47 Diagrama de fuerza cortante

c. Diagrama de momento flexionante

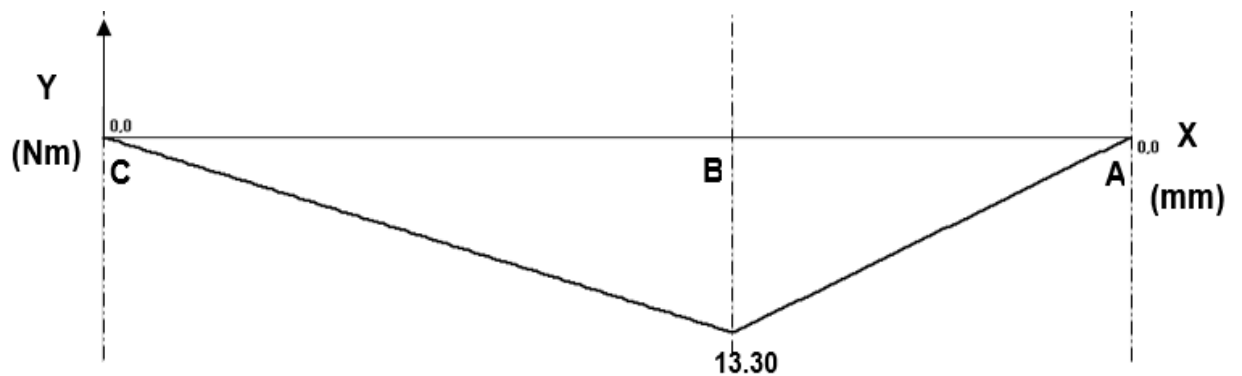


Figura 48 Diagrama de momento flexionante

Como se aprecia en el diagrama de momento flexionante el mayor momento se encuentra en el punto B, por tanto se tiene

$$M_B = 13.30 \text{ Nm}$$

### Momento en el punto A

$$M_A = 0 \text{ Nm}$$

### Diámetro en el punto B

De la Ecuación 2.29. reemplazando el valor del momento en B se tiene

$$D_B = \left[ \left( \frac{32 * F_s}{\pi * S_y} \right) * \left( M_B^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_B = \left[ \left( \frac{32 * 2.5}{\pi * 503 * 10^6 \text{ Pa}} \right) * \left( (13.30 \text{ Nm})^2 + \frac{3}{4} (44.20 \text{ Nm})^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_B = 0.0127 \text{ m} = 12.7 \text{ mm}$$

### Diámetro en el punto A

$$D_A = \left[ \left( \frac{32 * F_s}{\pi * S_y} \right) * \left( M_A^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_A = \left[ \left( \frac{32 * 2.5}{\pi * 503 * 10^6 \text{ Pa}} \right) * \left( (0 \text{ Nm})^2 + \frac{3}{4} (44.20 \text{ Nm})^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$D_B = 0.01246 \text{ m} = 12.46 \text{ mm}$$

Se observa que en el punto B donde ocurre el mayor momento el diámetro calculado para el eje es de 12.70 mm, mientras que en el cambio de sección del punto A el diámetro calculado es de 12.46mm.

El eje tendrá un diámetro uniforme para los puntos B y C, dado que el punto crítico fue en B predomina el valor del diámetro encontrado, estandarizando dicho valor se selecciona un eje con  $\varnothing = 1/2" = 12.70 \text{ mm}$  con lo que cumple el requerimiento de diseño. En cuanto al punto A se toma como valor de referencia el diámetro del motor en donde se acopla con el eje  $\varnothing = 47 \text{ mm}$ , con lo que supera el valor calculado y cumple con el diseño.

#### d. Selección del rodamiento

Se consideran los mismos parámetros utilizados en los cálculos de selección anterior,  $L_{10h} = 8000 \text{ horas}$ .

#### Rodamiento en el punto C

El rodamiento que se va a utilizar es un rodamiento de pared debido a que se ubicará en la tapa lateral de la estructura soportando el eje del motor. De la Ecuación 2.30. se tiene

$$L_d = L_{10h} * rpm * 60 \text{ min/h}$$

$$L_d = 8000 * 27.90 \text{ rpm} * 60 \text{ min/h}$$

$$L_d = 1.33 * 10^7 \text{ rev}$$

Reemplazando en la Ecuación 2.32.

$$F_d = V * R$$

El valor de  $V=1$  debido a que la pista interior del rodamiento es la que gira.

$$F_d = 1 * 468.03 \text{ N} = 468.03 \text{ N}$$

Reemplazando en la Ecuación 2.31.

$$C_r = F_d * \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$C_r = 468.03 \text{ N} * \left(\frac{1.33 * 10^7 \text{ rev}}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_r = 1108.90 \text{ N}$$

Para un valor de carga dinámica de 1108.90 N y un diámetro estándar de  $\frac{1}{2}$ " se encontró en el catálogo FAG (Anexo P) el rodamiento de la serie SBPFL201-08, siendo un rodamiento de pared con tornillos prisioneros en el anillo interior el cual satisface las condiciones de diseño.



## **2.5 Análisis Estructural de la plataforma omnidireccional**

En esta sección se muestra el análisis estático de los elementos críticos de la plataforma móvil como son los ejes de la rueda y del motor y la estructura base. Se hace una comparación entre los valores hallados mediante software y los valores calculados a través de fórmulas, se establece la concordancia de resultados y se da por válido el diseño.

Se consideran 3 criterios dentro del análisis estático para los elementos en estudio, la teoría de Von Mises, los desplazamientos resultantes y el factor de seguridad, los cuales se describen a continuación.

### **2.5.1 Teoría de Von Mises**

El criterio de máxima tensión de Von Mises conocido también como teoría de la energía de distorsión máxima, establece la cedencia en un punto para los materiales dúctiles cuando la tensión de Von Mises iguala al límite elástico del material analizado.

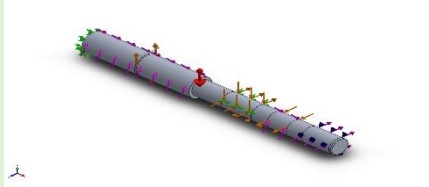
### **2.5.2 Desplazamientos Resultantes**

El desplazamiento resultante o URES indica el valor que se ha desplazado cada uno de los elementos respecto a su posición inicial. Se pueden apreciar valores de UX: Desplazamiento (dirección X), UY: Desplazamiento (dirección Y), UZ: Desplazamiento (dirección Z) y URES: Desplazamiento resultante.

### **2.5.3 Factor de seguridad**

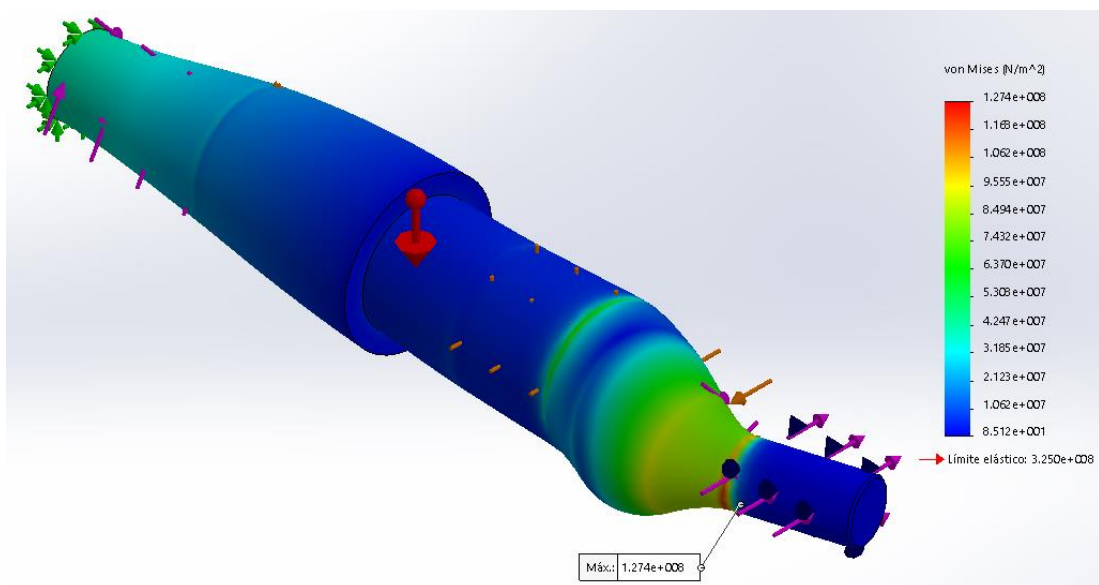
Según el libro del autor (Mott, 2006, pág. 185) determina el factor de diseño N, como una medida de seguridad relativa de un componente bajo la acción de una carga. Por tanto, el esfuerzo real al que se somete un elemento debe ser menor que el esfuerzo de diseño para considerar como seguro el diseño. También es posible relacionar para este factor los esfuerzos reales aplicados y la resistencia del material.

### **2.5.4 Eje de la rueda**

| Referencia de modelo  | Propiedades         |                            |
|---|---------------------|----------------------------|
|  | Material:           | Aluminio 2024-T4           |
|   | Criterio de error:  | Tensión de von Mises       |
|   | Límite elástico:    | 3.25e+008 N/m <sup>2</sup> |
|   | Límite de tracción: | 4.7e+008 N/m <sup>2</sup>  |
|   | Módulo elástico:    | 7.24e+010 N/m <sup>2</sup> |

### Criterios de análisis

| Nombre     | Tipo                      | Mín.                                    | Máx.   |
|------------|---------------------------|---|--|
| Tensiones1 | VON: Tensión de von Mises | 85.1249 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 52687 | 1.27403e+008 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 39017 |



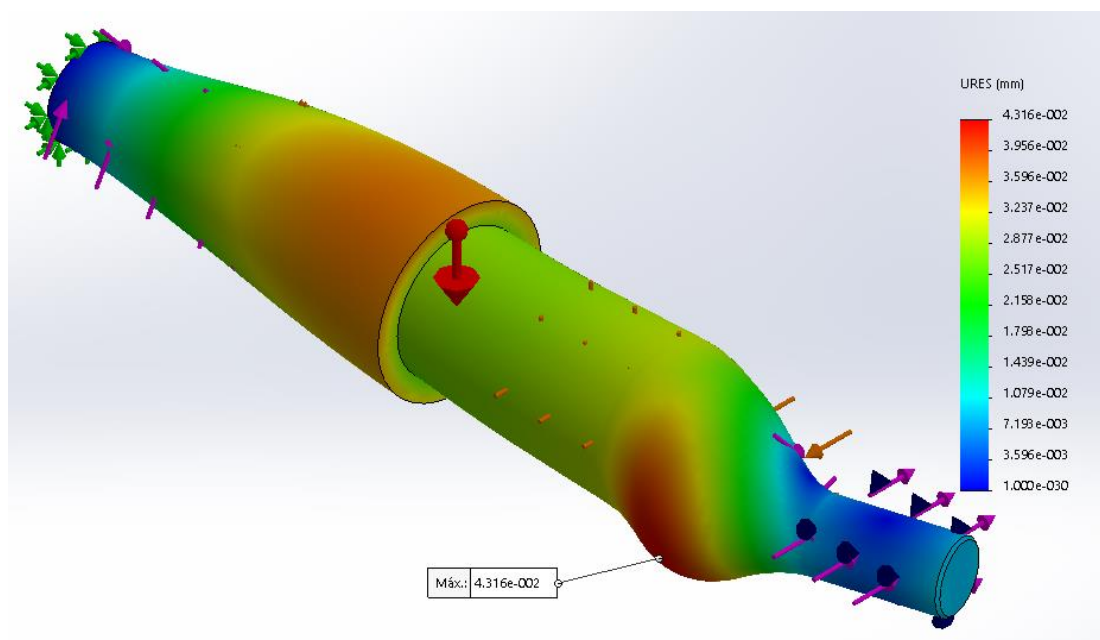
**Figura 49 Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en el eje de la rueda**

### Trazado de tensiones

La mayor tensión se encuentra en la parte inicial del eje, en el contacto con la chumacera de piso. La tensión máxima se da en el nodo 39017 con un valor

de  $1.27403e+008 \frac{N}{m^2}$ . La tensión máxima es inferior al límite elástico del material  $3.25e+008 \frac{N}{m^2}$  por lo que se considera como seguro el diseño.

| Nombre          | Tipo                                    | Mín.              | Máx.                       |
|-----------------|---|-------------------|----------------------------|
| Desplazamientos | URES:<br>Desplazamientos<br>resultantes | 0 mm<br>Nodo: 575 | 0.0431558 mm<br>Nodo: 2142 |

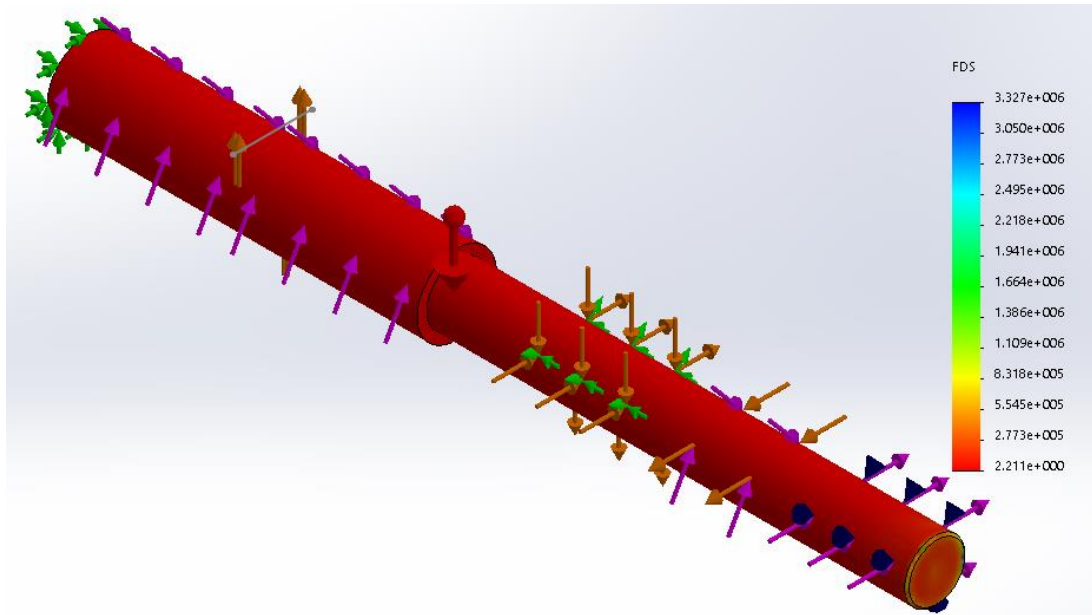


**Figura 50 Desplazamientos resultantes en el eje de la rueda**

### Trazado de desplazamientos

Los mayores desplazamientos se producen en la zona entre el apoyo de la chumacera de piso y la catarina. El valor máximo llega hasta 0.043 milímetros en el nodo 2142.

| Nombre               | Tipo                                  | Mín.                   | Máx.                        |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Factor de seguridad1 | Tensión de cortadura<br>máx. (Tresca) | 2.21067<br>Nodo: 39017 | 3.32726e+006<br>Nodo: 52687 |

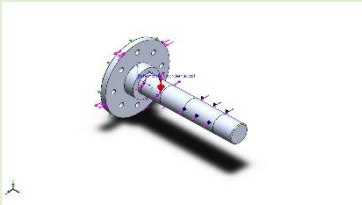


**Figura 51 Factor de seguridad mínimo en el eje de la rueda**

### Trazado del factor de seguridad

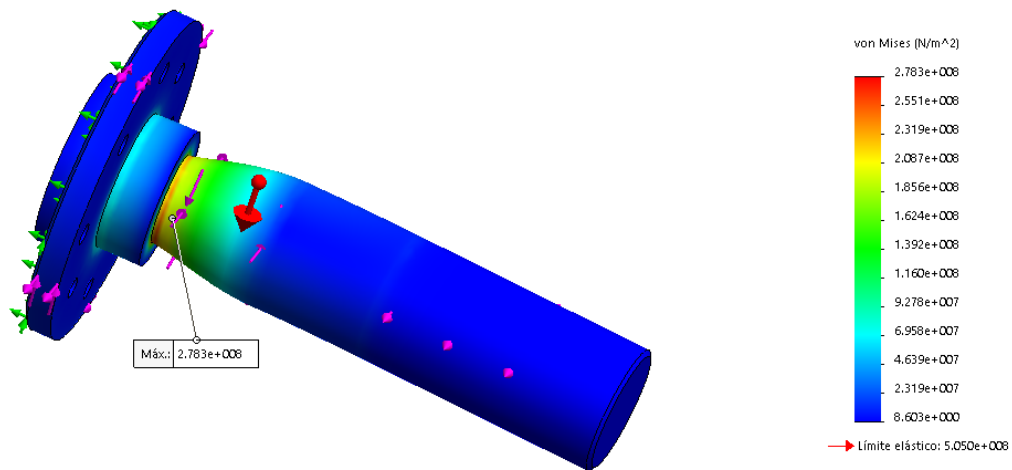
El valor mínimo del factor de seguridad calculado se encuentra en el nodo 39017 y es de 2.21, valor que se encuentra por debajo del establecido de 2.5 en la sección 2.4.1 considerando el diseño como seguro.

### 2.5.5 Eje del motor

| Referencia de modelo  | Propiedades         |                            |
|---|---------------------|----------------------------|
|  | Material:           | Aluminio 7075-T6 (SN)      |
|   | Criterio de error:  | Tensión de von Mises.      |
|   | Límite elástico:    | 5.05e+008 N/m <sup>2</sup> |
|   | Límite de tracción: | 5.7e+008 N/m <sup>2</sup>  |
|   | Módulo elástico:    | 7.2e+010 N/m <sup>2</sup>  |

### Criterios de análisis

| Nombre     | Tipo                      | Mín.                                   | Máx.   |
|------------|---------------------------|--|--|
| Tensiones1 | VON: Tensión de von Mises | 8.6033 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 58158 | 2.78329e+008 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 51210 |

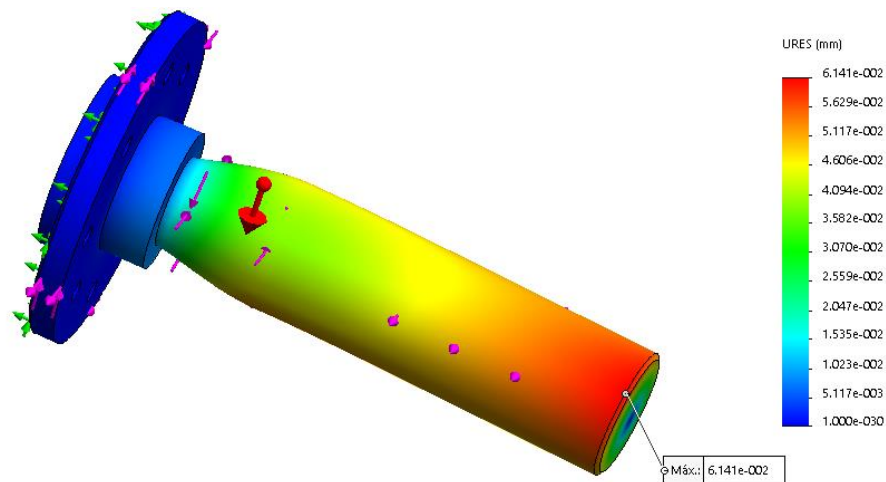


**Figura 52 Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en el eje del motor**

**Trazado de tensiones**

La mayor tensión se encuentra en el cambio de sección del eje, ubicada en el nodo 51210 con un valor de  $2.78329e+008 \frac{N}{m^2}$ . La tensión máxima es inferior al límite elástico del material  $5.05e+008 \frac{N}{m^2}$  por lo que se considera como seguro el diseño.

| Nombre           | Tipo                                 | Mín.             | Máx.                      |
|------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Desplazamientos1 | URES:<br>Desplazamientos resultantes | 0 mm<br>Nodo: 52 | 0.0614073 mm<br>Nodo: 196 |



**Figura 53 Desplazamientos resultantes en el eje del motor**

### Trazado de desplazamientos

Los mayores desplazamientos se producen en la zona final del eje cercano al apoyo de la chumacera de pared. El valor máximo llega a 0.061 milímetros en el nodo 196.

| Nombre               | Tipo                               | Mín.                   | Máy.                        |
|----------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Factor de seguridad1 | Tensión de cortadura máx. (Tresca) | 1.57188<br>Nodo: 51210 | 5.09981e+007<br>Nodo: 58158 |

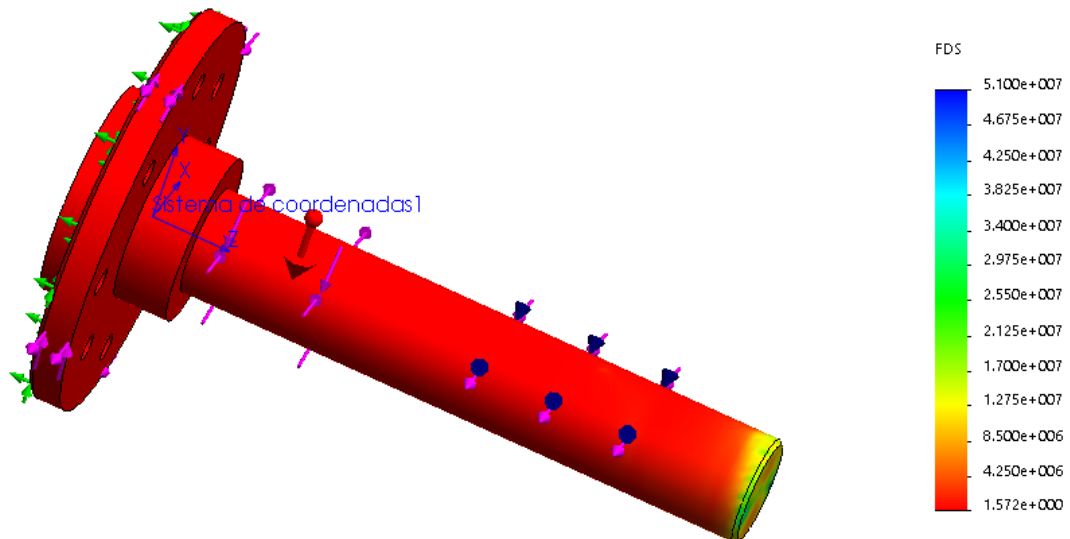
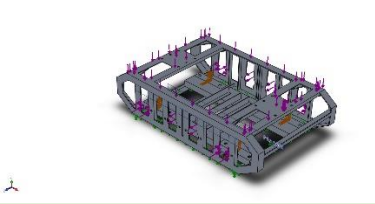


Figura 54 Factor de seguridad mínimo en el eje del motor

### Trazado del factor de seguridad

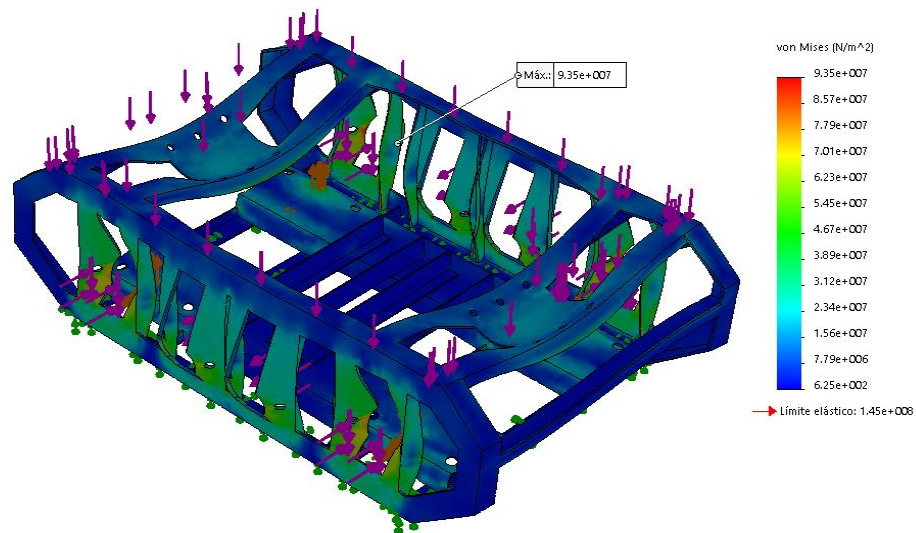
El valor mínimo del factor de seguridad calculado se encuentra en el nodo 51210 y es de 1.57, valor que se encuentra por debajo del establecido de 2.5 en la sección 2.4.2 considerando el diseño como seguro.

## 2.5.6 Estructura base

| Referencia de modelo  | Propiedades         |                            |
|---|---------------------|----------------------------|
|  | Material:           | Aluminio 6063-T5           |
|   | Criterio de error:  | Tensión de von Mises       |
|   | Límite elástico:    | 1.45e+008 N/m <sup>2</sup> |
|   | Límite de tracción: | 1.85e+008 N/m <sup>2</sup> |
|   | Módulo elástico:    | 6.9e+010 N/m <sup>2</sup>  |

### Criterios de análisis

| Nombre     | Tipo                      | Mín.                                    | Máx.   |
|------------|---------------------------|---|--|
| Tensiones1 | VON: Tensión de von Mises | 625.376 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 22361 | 9.34658e+007 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 32189 |



**Figura 55 Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en la estructura base**

### Trazado de tensiones

La mayor tensión se encuentra en las placas de soporte laterales donde van ubicadas las chumaceras de pared, ubicada en el nodo 32189 con un valor de  $9.34658e+007 \frac{N}{m^2}$ . La tensión máxima es inferior al límite elástico del material  $1.45e+008 \frac{N}{m^2}$  por lo que se considera como seguro el diseño.

| Nombre           | Tipo                                    | Mín.               | Máy.                      |
|------------------|---|--------------------|---------------------------|
| Desplazamientos1 | URES:<br>Desplazamientos<br>resultantes | 0 mm<br>Nodo: 4998 | 0.84742 mm<br>Nodo: 24979 |

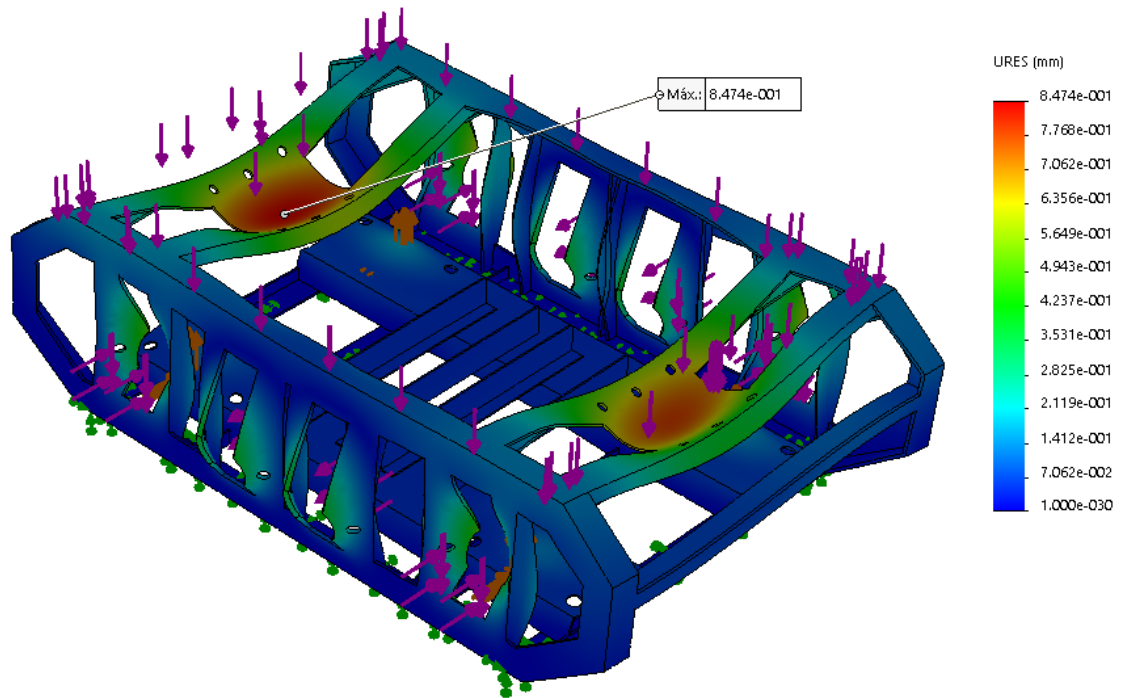


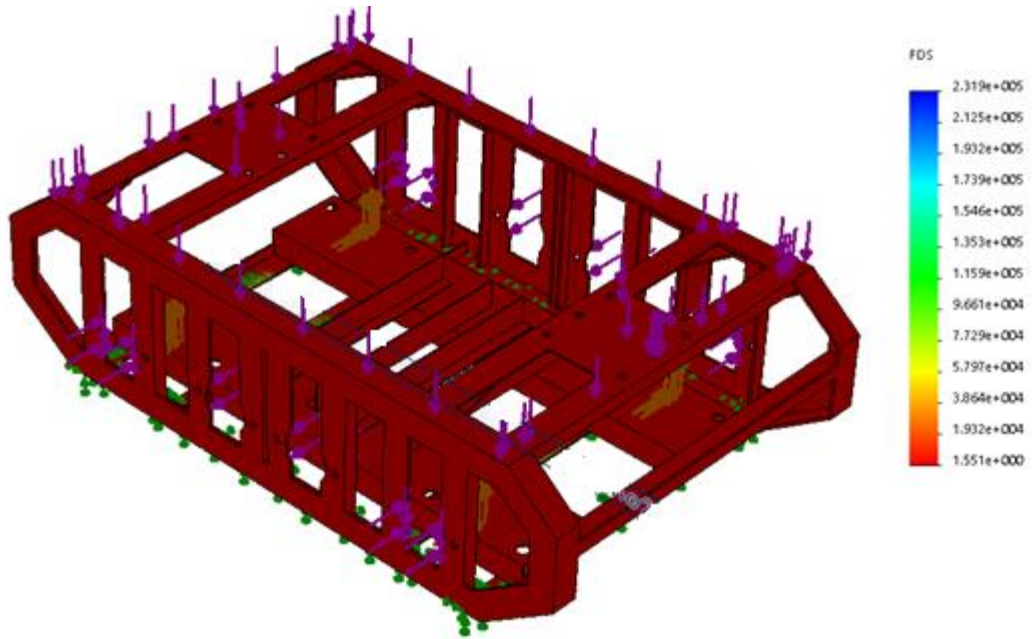
Figura 56 Desplazamientos resultantes en la estructura base

### Trazado de desplazamientos

Los mayores desplazamientos se producen en la parte superior de la estructura en el soporte para los brazos robóticos. El valor máximo llega a 0.847 milímetros en el nodo 24979.

| Nombre               | Tipo                         | Mín.                   | Máy.                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Factor de seguridad1 | Tensión de von<br>Mises máx. | 1.55137<br>Nodo: 32189 | 231860<br>Nodo: 22361 |





**Figura 57 Factor de seguridad mínimo para la estructura base**

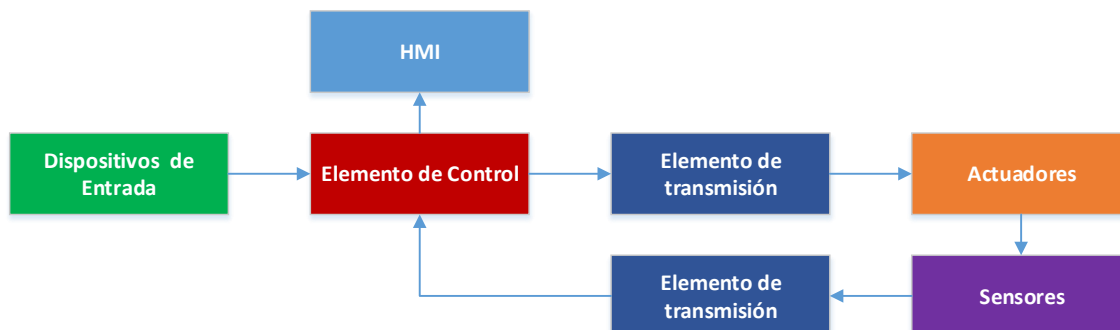
### **Trazado del factor de seguridad**

El valor mínimo del factor de seguridad calculado se encuentra en el nodo 32189 y es de 1.55, valor que supera el límite de 1.5 para considerar al diseño como seguro.

### **2.6 Selección de componentes eléctricos y de control**

El propósito de la plataforma móvil es lograr desplazarse dentro de una superficie, para ello hasta el momento se ha determinado las dimensiones y materiales de todos los elementos estructurales de la máquina en cuestión, especificando así las fuerzas que actúan sobre la misma, todo esto para establecer la fuerza que se requiere para impulsar todo este conjunto mecánico, es entonces que en el diseño y selección de los elementos eléctricos, electrónicos y de control se va a abordar un análisis cuidadoso para elegir elementos como; los actuadores que son los encargados de proveer de la fuerza necesaria para el desplazamiento, pasando luego a los dispositivos de comunicación que transmiten información desde la unidad de control hacia los efectores y situándose en el ápice de este diseño tenemos al elemento de control, este agente computacional recepta y procesa los

comandos dados por el usuario, creando señales eléctricas necesarias para el control correcto de movimientos.



**Figura 58 Diagrama de bloques del sistema eléctrico y control**

Un esquema general del sistema eléctrico, electrónico y de control se muestra en la figura, donde se puede observar de una manera más gráfica las etapas en las que se centra esta fase de la investigación, cada subsistema está conformado por un elemento principal y varios secundarios, el diseño y selección estará focalizado más a los elementos primordiales entendiendo que los otros elementos son poco irrelevantes y no requieren de un análisis detallado para su adquisición. Para lograr calificar a cada una de las alternativas se hace uso de la técnica de puntuación, la tabla detalla las ponderaciones establecidas para la evaluación.

**Tabla 4**

**Tabla de Ponderaciones**

| Interpretación       | Porcentaje [%] | Calificación |
|----------------------|----------------|--------------|
| <b>Excelente</b>     | 76 - 100       | 10           |
| <b>Bueno</b>         | 51 - 75        | 7            |
| <b>Satisfactorio</b> | 26 - 50        | 4            |
| <b>Insuficiente</b>  | 0 - 25         | 2            |

### 2.6.1 Actuadores

Los componentes que transforman la energía eléctrica almacenada por los acumuladores dando de esta forma vida a los mecanismos son los actuadores que para el caso del proyecto son cuatro motores eléctricos, cada uno impulsa un mecanismo cadena catalina transmitiendo la fuerza del motor hacia las ruedas. La fuerza requerida para desplazar la plataforma, incluido todos sus elementos de control, acumuladores de energía, acoples mecánicos, etc. Requiere de una potencia de 560 watts, distribuyendo esta carga para las cuatro ruedas tenemos que cada motor debe ser de 140 watts. La potencia de un motor comercialmente viene establecida en hp entonces es común encontrarse en el mercado con motores de un cuarto de hp.

Dentro de los motores más relevantes disponible en el mercado tenemos los siguientes:

- BLDC Motor 60BLF99 -430
- Dayton MY1020
- ZikoDrive ZD4N2318 NEMA 23
- Dynamixel pro h54-200-500

**Tabla 5**  
**Motores Disponibles**

| Alternativas       |               | Parámetros de Selección |          |           |         |         |          | Calificación |
|--------------------|---------------|-------------------------|----------|-----------|---------|---------|----------|--------------|
| Fabricante         | Modelo        | Tamaño                  | Potencia | Velocidad | Voltaje | Control | Sensores |              |
| <b>BLDC Motors</b> | 60BLF99 - 430 | 2                       | 3        | 5         | 2       | 1       | 1        | 13           |

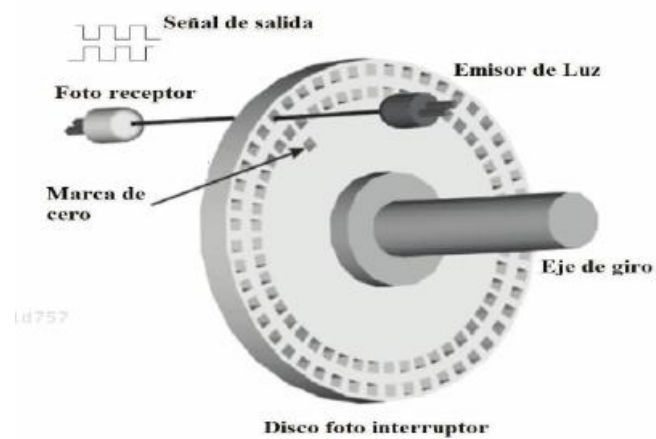
|                      |             |   |   |   |   |   |   |    |
|----------------------|-------------|---|---|---|---|---|---|----|
| <b>Dayton</b>        | MY1020      | 2 | 3 | 5 | 2 | 1 | 1 | 13 |
| <b>ZikoDrive</b>     | ZD4N2318    | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 | 19 |
| <b>Dynamixel Pro</b> | h54-200-500 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 22 |

La tabla es elocuente y muestra que el motor de Dynamixel Pro posee mejor características técnicas que sus competidores y entre ellas tenemos que son extremadamente compactos, su potencia es muy elevada debido a que cuentan con una caja reductora de velocidad razón por que se tiene una baja velocidad de operación, el voltaje de trabajo es mucho menor entre los otros candidatos, además algo muy importante que posee es una tarjeta de control incorporada con sus propios sensores, circuitería de corrección de errores y una avanzada interfaz de comunicación industrial. A continuación se muestran las características técnicas del motor seleccionado.

## 2.6.2 Sensores

### a. Encoder

Son sensores de posición ampliamente utilizados en robótica para determinar el ángulo de giro de un servomotor se encuentran en la fase de retro alimentación del sistema de control del servo motor, un encoder consta de un emisor de luz, un receptor y en medio de estos dos componentes gira un disco con ranuras las cuales interrumpen la luz del emisor, generando de esta manera la señal de onda cuadrada característica de un encoder, en la figura se puede apreciar las partes de un encoder. (Reyes, 2011)



**Figura 59 Encoder**

**Fuente:** (Reyes, 2011)

### **b. Tacómetro**

Son dispositivos que por lo general van acoplados mecánicamente al eje motriz de un servo motor, generan un voltaje el cual es proporcional a la velocidad a la que gira, los encoders más utilizados son aquellos que utilizan un magneto rotatorio que va acoplado al motor, en la figura se muestra un tacómetro convencional. (Reyes, 2011)

### **c. Sensor de temperatura**

Los sensores de temperatura se usan para medir la temperatura del aire o la temperatura superficial de líquidos y sólidos. Existe una gran gama de sensores de temperatura con aplicaciones específicas dependiendo de las aplicaciones que se le pueden dar. (PCE-iberica, 2015)

El servo motor DYNAMIXEL PRO H54-200-S500-R ya posee incorporados los sensores mencionados por lo que no hay necesidad de adquirirlos por separado, para acceder a los valores de cada uno basta con leer la dirección correspondiente dentro de la tabla de almacenamiento en la memoria RAM del control interno del motor.

### 2.6.3 Elementos de Control

Los elementos de control son los encargados de recibir señales externas, interpretarlas y generar señales eléctricas para comandar a los actuadores, se ha visto conveniente que el elemento de control para este proyecto sea un computador con características industriales en vista que debe soportar movimientos bruscos y estar expuesto a ambientes llenos de contaminantes como puede ser polvo, humedad, etc.

A continuación se listan las mejores opciones en cuanto a controladores disponibles en el mercado:

- Advantech TREK-688
- RS Raspberry Pi 3
- EGLOBAL Fanless mini Pc i7
- Siemens S7-1200 CPU 1214C

**Tabla 6**  
**Controladores disponibles**

| Alternativas     |                    | Parámetros de Selección |              |              |       |            | Calificación |
|------------------|--------------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|------------|--------------|
| Fabricante       | Modelo             | Tamaño                  | Alimentación | Vel. Process | Wi-Fi | Puerto USB |              |
| <b>Advantech</b> | TREK-688           | 3                       | 5            | 3            | 3     | 2          | 16           |
| <b>RS</b>        | Raspberry Pi 3     | 5                       | 5            | 2            | 3     | 2          | 17           |
| <b>EGLOBAL</b>   | Fanless mini Pc i7 | 3                       | 5            | 5            | 5     | 5          | 23           |
| <b>Siemens</b>   | S7-1200 CPU 1214C  | 5                       | 5            | 2            | 2     | 2          | 16           |

El controlador más idóneo es el computador industrial Eglobal Fanless mini PC i7, debido a su alta velocidad de procesamiento ya que su placa madre

incorpora un procesador i7 a 3Ghz, en lo referente a la alimentación este computador requiere de 12V de DC para, posee dos antenas Wi-Fi, 6 puertos de bus universal (USB) y todo esto dentro de una área reducida.

**a. Eglobal Fanless mini PC i7.**



**Figura 60 Eglobal mini PC**

**Fuente:** (Eglobal, 2013)

**Tabla 7**

**Característica Técnicas del computador industrial**

| Eglobal Fanless mini PC i7                 |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Tipo</b>                                | Mini PC                 |
| <b>Tipo de tarjeta gráfica</b>             | Tarjeta integrada       |
| <b>Capacidad del disco duro</b>            | 1TB                     |
| <b>Frecuencia principal del procesador</b> | 3.0GHz                  |
| <b>Memoria RAM</b>                         | 4GB                     |
| <b>Procesador</b>                          | Intel Core i7           |
| <b>Número de modelo</b>                    | V7-i7                   |
| <b>Operating System</b>                    | Win 7                   |
| <b>USB port</b>                            | 4* USB 3.0, 2 * USB 2.0 |
| <b>Feature</b>                             | Fanless System          |
| <b>Wireless</b>                            | 150M - 300M             |

**CONTINÚA** 

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| <b>Display port</b>     | HDMI and DP port      |
| <b>Graphics</b>         | Intel HD4400 Graphics |
| <b>Case</b>             | 185*220*40 mm         |
| <b>Chipset</b>          | Intel Haswell-ULT     |
| <b>Storage Capacity</b> | 128GB SSD 1TB HDD     |

Fuente: (Englobal, 2013)

#### 2.6.4 Elementos de transmisión

Transmitir datos entre el controlador y los actuadores es necesaria para la operación de la plataforma, cada aparato utiliza protocolos de comunicación distinta, en consecuencia a esto se debe utilizar un elemento con la capacidad de traducir las señales de comunicación del computador a señales de comunicación serial industrial 485. Disponibles en el mercado hay un sin número de dispositivos de esta clase es por lo que se procederá a realizar una evaluación de las características de cada uno de ellos para seleccionar el mejor del siguiente listado:

- Malasia CP2102
- USB2Dynamixel Adapter
- STM 485S
- TeckMicro Rs485 R

**Tabla 8**  
**Transmisores RS485**

| Alternativas   |        | Parámetros de Selección |           |                    |        | Calificación |
|----------------|--------|-------------------------|-----------|--------------------|--------|--------------|
| Fabricante     | Modelo | Tamaño                  | Distancia | Protección a ruido | Precio |              |
| <b>Malasia</b> | CP2102 | 3                       | 5         | 2                  | 5      | 15           |

CONTINÚA





|                  |         |   |   |   |   |    |
|------------------|---------|---|---|---|---|----|
| <b>Dynamixel</b> | USB2D   | 3 | 5 | 5 | 3 | 16 |
| <b>STM</b>       | 485S    | 3 | 5 | 5 | 2 | 15 |
| <b>TeckMicro</b> | Rs485 R | 3 | 5 | 2 | 5 | 15 |

El conversor USB2Dynamixel Adapter es el más idóneo, aunque no haya sobresalido con un gran puntaje de sus competidores posee una característica muy importante que se debe tomar en cuenta cuando se trabaja con motores, como sabemos los campos electromagnéticos presentes en los motores generan una gran cantidad de ruido, este dispositivo cuenta con la capacidad de ser inmune a estos disturbios y además por ser un elemento del mismo fabricante de los motores sus librerías y software de programación se adaptan fácilmente .

**a. USB2Dynamixel Adapter**



**Figura 61 USB2Dynamixel Adapter**

**Fuente:** (TrossenRobotics, 2009)

Es un dispositivo USB que permite transformar la información proveniente de un computador a información legible para dispositivos de potencia ya sean motores, electro válvulas, etc. Que soporten comunicación industrial RS485. Es de fácil configuración, se puede utilizar bajo cualquier sistema operativo ya que sus drivers están disponibles en la web, posee una gran protección contra ruidos electromagnéticos haciéndolos inmunes a errores de comunicación como adicional cabe agregar que posee una salida RS232 TTL que se la puede utilizar como un depurador serial. Dentro de todo el sistema se puede

utilizar este mismo elemento tanto para transmitir como para recibir información, entonces solo se requiere de solo adaptador. A continuación en la tabla se muestran la descripción de sus componentes.

**Tabla 9**  
**Características USB2Dynamixel Adapter**

| USB2Dynamixel                    |  |
|----------------------------------|--|
| Parte                            | Descripción  |
| <b>Status Display LED</b>        | Display power supply, TXD(data writing), and RXD(data reading) status. |
| <b>Function Selection Switch</b> | Select the communication method of TTL, RS-485, and RS-232.            |
| <b>3P Connector</b>              | Connect Dynamixels of AX Series through TTL communication.             |
| <b>4P Connector</b>              | Connect Dynamixels of DX, RX Series through RS-485 communication.      |
| <b>Serial Connector</b>          | Change from USB port to Serial port through RS-232 communication.      |

**Fuente:** (TrossenRobotics, 2009)

### 2.6.5 Dispositivos de Entrada

La selección de estos componentes no requiere de un análisis a detalle, esto se debe a que para dar información a la computadora se la puede hacer mediante cualquier elemento de entrada/salida estándar como puede ser con teclado, mouse, joystick, etc. Y en este caso particular se lo puede realizar por medio de un acceso remoto es decir controlar al computador desde otro computador dentro de una red.

### 2.6.6 Baterías

Las baterías son elementos eléctricos que tienen la capacidad de almacenar energía eléctrica y suministrarla cuando sea necesario, por lo que pueden dar autonomía de funcionamiento al robot omnidireccional.

Las baterías de litio y polímero (LiPo) poseen características mejoradas que sus antecesoras como por ejemplo una tasa de descarga muy alta, ligeras y en tamaños muy reducidas; es por ello que se avisto la posibilidad de hacer uso de las mismas.

Para la seleccionar las baterías se realizó el cálculo de la potencia requerida por todos los elementos inherentes y de mayor consumo de la plataforma.

$$P_T = P_{Computador} + P_{Motores} \quad \text{Ec. 2.36.}$$

$$P_{Motor} = V_{Motor} * I_{Motor} \quad \text{Ec. 2.37.}$$

$$P_{Motor} = 24V * 5A$$

$$P_{Motores} = 4 * P_{Motor}$$

$$P_{Motores} = 4 * 120 = 480watts$$

$$P_T = P_{Motores} + P_{pc}$$

$$P_T = 15watts + 480 watts = 495watts$$

A continuación se presentan varias alternativas para la selección de las baterías.

- MultiStar 5200mA 4s
- ZIPPY Compact 5800mAh 7S
- Turnigy 5800mAh 3S
- Traxxas 5800mAh

**Tabla 10**  
**Parámetros de selección de la batería**

| Alternativas |        | Parámetros de Selección |           |         |            | Calificación |
|--------------|--------|-------------------------|-----------|---------|------------|--------------|
| Fabricante   | Modelo | Tamaño                  | Capacidad | Voltaje | Cons. Des. |              |

CONTINÚA



|                      |               |   |   |   |   |    |
|----------------------|---------------|---|---|---|---|----|
| <b>MultiStar</b>     | 5200mA 4s     | 3 | 5 | 3 | 2 | 13 |
| <b>ZIPPY Compact</b> | 5800mAh<br>7S | 3 | 5 | 5 | 5 | 18 |
| <b>Turnigy</b>       | 5800mAh<br>3S | 3 | 5 | 2 | 3 | 13 |
| <b>Traxxas</b>       | 5800mAh       | 5 | 5 | 2 | 3 | 15 |

La tabla demuestra que las baterías de ZIPPY Compact son la mejor opción debido a que poseen un factor de descarga elevado, alto voltaje y una elevada capacidad, sin embargo, una sola batería no es suficiente para suministrar energía a la plataforma y mucho menos a otros dispositivos que se planeen colocar sobre ella a futuro, para obtener la potencia requerida se ha visto conveniente establecer un arreglo de baterías en paralelo con el fin de incrementar la corriente de alimentación, realizando los cálculos para determinar la cantidad de acumuladores necesarios.

#### a. ZIPPY Compact 5800mAh

Zippy Compact ofrece un excelente rendimiento y alta calidad en un tamaño compacto, estos paquetes ofrecen alta capacidad y velocidad de descarga que favorecen al momento de dar energía cuando los actuadores estén trabajando y existe alta demanda de energía.



**Figura 62 ZIPPY Compact 5800mAh**

**Fuente:** (HobbyKing, 2009)

**Tabla 11**  
**Características Técnicas de ZIPPY Compact 5800mAh**

| ZIPPY Compact 5800mAh       |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| <b>Capacidad</b>            | 5800mAh               |
| <b>Voltaje</b>              | 7S1P / 7 Cell / 25.9V |
| <b>Descarga</b>             | 35C                   |
| <b>Peso</b>                 | 913g                  |
| <b>Dimensiones</b>          | 160x46x57mm           |
| <b>Conector de Carga</b>    | JST-XH                |
| <b>Conector de descarga</b> | 5.5mm Bullet          |

Fuente: (HobbyKing, 2009)

El número de baterías requeridas vendrá dada por la expresión

$$NumBat = \frac{P_T}{P_{Bat}} \quad \text{Ec. 2.38.}$$

$$P_{Bat} = V_{Bat} * I_{Bat} = 25,9V * 5,8 A = 150.22$$

$$NumBat = \frac{495 \text{ watts}}{150.22 \text{ watts}}$$

$$NumBat = 3,3 \approx 4 \text{ Baterías}$$

## 2.7 Diseño y construcción de los sistemas de control y potencia para la plataforma omnidireccional

Al tratarse de un trabajo de investigación basado en el proyecto base de tele-operación corporativa, tanto el diseño del sistema de potencia y de control tienen sus fundamentos en los diseños originales realizando únicamente modificaciones en la adición de elementos debido al aumento de actuadores a controlar pero que a su vez, sigan garantizando el correcto funcionamiento del sistema.

Se mantiene el esquema electrónico como tal, filtros, elementos de protección y reguladores de voltaje, etapas de diseño y aspecto físico en

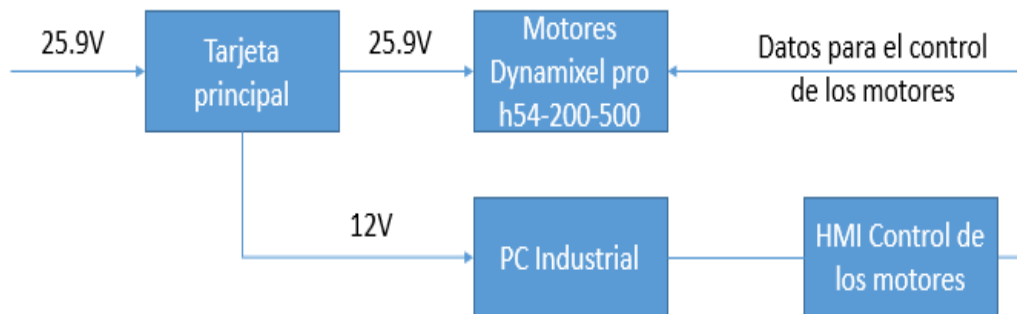
general. A continuación se detalla la fabricación de las placas que permiten controlar la plataforma omnidireccional.

### 2.7.1 Sistema de potencia

El sistema de potencia consta de 3 placas fabricadas en baquela de doble lado con los elementos soldados en la parte superior. La primera placa aloja a las baterías y protecciones, la segunda es designada para el control de los actuadores y la última es la placa general de control.

La placa de conexión de las baterías, permite conectar 4 baterías Lipo de 7 celdas en configuración en paralelo. La placa principal envía una señal para activar los motores Dynamixel y, a su vez, tiene una salida regulada de voltaje a 12v con la cual se alimenta la PC industrial.

En la figura 54 se puede observar la conexión de las placas del sistema de potencia, a la placa principal ingresa el voltaje de las baterías activando los motores Dynamixel y la PC en donde se realiza el control de los motores.



**Figura 63 Conexión de las Tarjetas del sistema de potencia**

### 2.7.2 Sistema de control

Para realizar el control de la plataforma se emplea el software Visual Studio V12, se desarrolla un HMI amigable con el usuario, en el cual el operador ingresa datos como: ángulo de desplazamiento, velocidad lineal, velocidad en el eje "x", velocidad en el eje "y" o velocidad angular como se puede observar en la figura 56.



**Figura 64** Interfaz de control de la plataforma omnidireccional



**Figura 65** Interfaz de ingreso de datos por el usuario

Para iniciar el control de la plataforma omnidireccional existen cuatro maneras distintas de hacerlo las cuales se detallan a continuación:

1. Ingresar la velocidad lineal y el ángulo al que se desea que se desplace.
2. Ingresar los componentes de velocidad tanto para el eje "x" y el eje "y".

3. Ingresar la velocidad angular y elegir el sentido de giro de la plataforma, ya sea en sentido de las manecillas del reloj (SMR) o contrario a las manecillas del reloj (CMR).
4. Es posible también ocupar la parte de movimientos especiales como se muestra en la figura 2, para el uso de esta opción hay que ingresar la velocidad lineal y elegir el movimiento que desee que realice la plataforma.

En el programa se realizaron restricciones en cuanto al ángulo y a la máxima velocidad lineal y angular, que el operador pueda ingresar, si este llegara a ingresar un ángulo o velocidad superior a la permitida, se le presentara un aviso y la velocidad automáticamente se pondrá la máxima en la línea de comando.

## **2.8 Construcción y ensamblaje de la plataforma móvil omnidireccional**

Inicialmente el trabajo desarrollado en este documento se fundamentaba únicamente en la implementación de ruedas omnidireccionales dentro del proyecto base. Se realizaron análisis previos con el diseño mecánico ya propuesto para determinar si el esquema presentado satisfacía los requerimientos para las llantas seleccionadas.

Se encontraron inconvenientes para la implementación directa de las ruedas en la plataforma original debido a que el sistema de tracción montado consistía en bandas y poleas con dos motores para su movimiento. Las llantas omnidireccionales emplean necesariamente un motor para la tracción de cada rueda, por tal motivo se consideró el diseño de un nuevo sistema de tracción que se sujete a las consideraciones de las llantas omnidireccionales.

Posteriormente, se define el sistema de tracción por cadenas descrita en la sección 1.9.2 y se toma la decisión de construir una plataforma robótica basada en el diseño original, se conserva la estructura modelo pero se visualiza más compacta. A continuación se presenta un resumen del proceso de rediseño, construcción e implementación de la plataforma robótica omnidireccional.



## 2.9 Construcción

### 2.9.1 Construcción de la matriz y estructura de aluminio

El diseño final para la plataforma móvil se aprecia en la figura 27 de la sección 2.1, al conservarse el modelo original se procede a construir una matriz de hierro con las medidas especificadas en el Anexo Q.



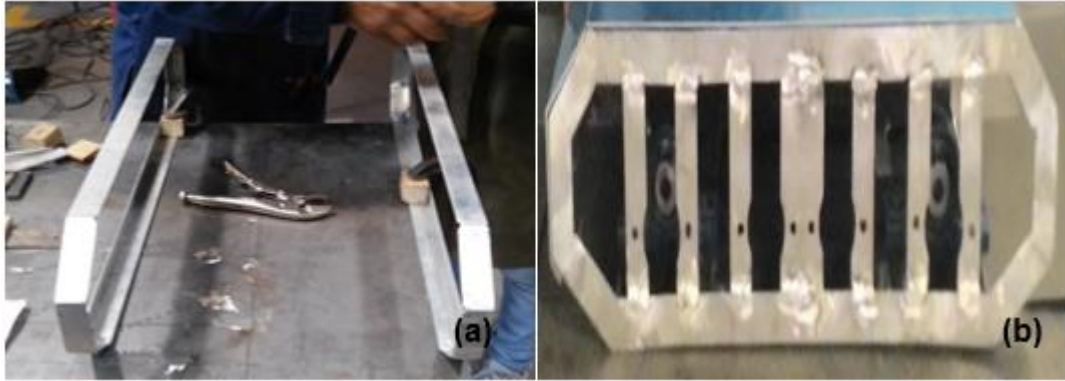
**Figura 66 Matriz de hierro para soporte de la estructura**

Una vez obtenida la matriz, se construyen las dos estructuras laterales de soporte en aluminio estructural.



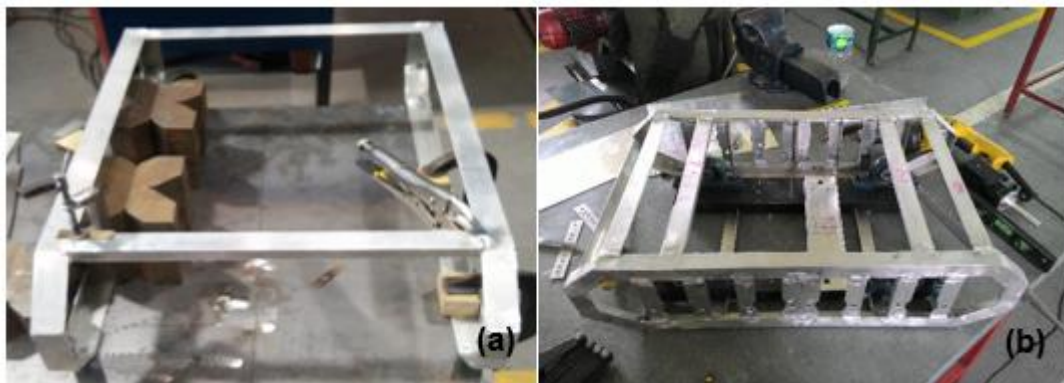
**Figura 67 Estructura lateral de soporte**

Posterior, se sueldan los soportes laterales que dan forma a la estructura base de la plataforma como se muestra en la figura 64. Entre los soportes laterales se sueldan también pequeñas placas que alojan a las chumaceras de pared sobre las cuales se asientan los ejes de la rueda y del motor.



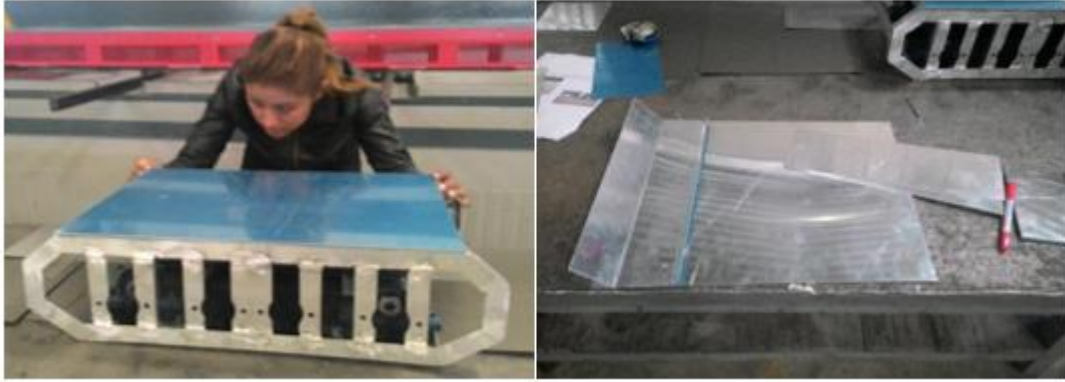
**Figura 68 a) Suelda de estructuras laterales, b) Suelda de placas en estructuras laterales**

Se coloca un perfil transversal en los extremos superior e inferior para la unión de los dos soportes laterales y se suelda también un perfil transversal en la parte frontal. Finalmente se tiene la estructura totalmente soldada y lista para el corte de las tapas que la recubren.



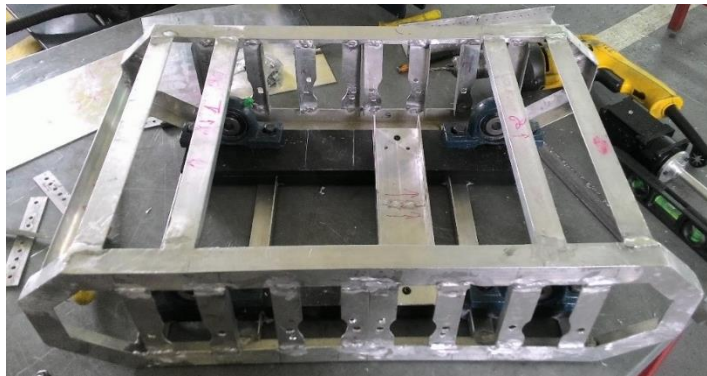
**Figura 69 a) Suelda de perfiles transversales, b) Estructura base soldada**

Una vez que se tiene la estructura base se procede a medir y cortar las tapas (superior, inferior, lateral, frontal y posterior) que la recubren.



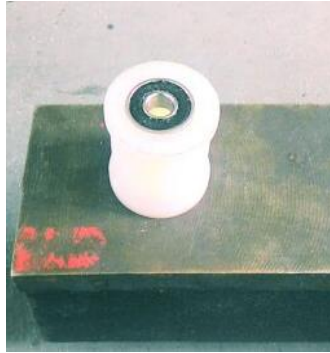
**Figura 70 Medición y corte de las tapas**

Al interior de la estructura se sueldan dos perfiles negros de aluminio en U que sirven para soportar las 4 chumaceras de piso sobre las cuales se asientan los ejes de las ruedas omnidireccionales. De la misma manera se colocan de manera transversal a los primeros, dos perfiles en U de aluminio más resistente para la sujeción de los cuatro motores.

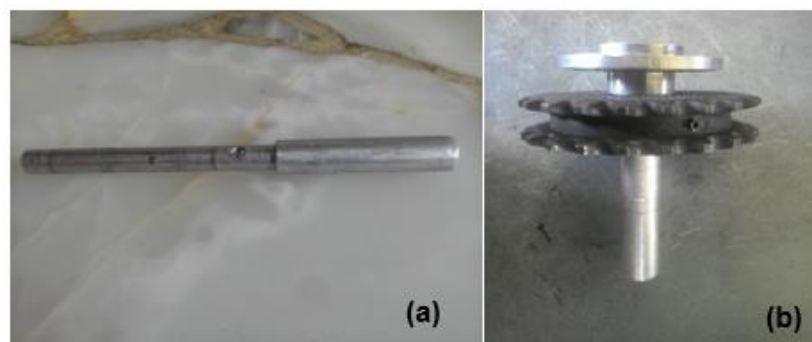


**Figura 71 Suelda de los perfiles en U**

Es importante también mencionar el mecanizado de los tensores para las cadenas, el mecanizado de los ejes para los motores y las ruedas y la inserción de los pasadores en los ejes para la sujeción de las catarinas y piñones como se muestran en las figuras siguientes.



**Figura 72 Tensores de duralón para las cadenas**



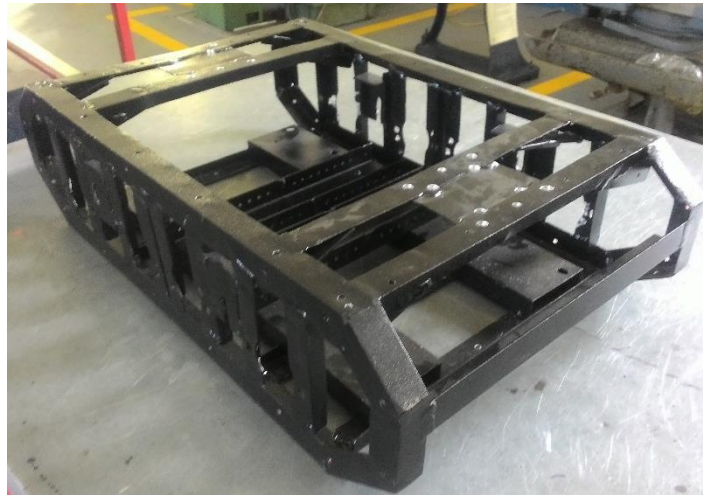
**Figura 73 a) Eje para las ruedas, b) Eje para los motores**



**Figura 74 Perforación en ejes para pasadores**

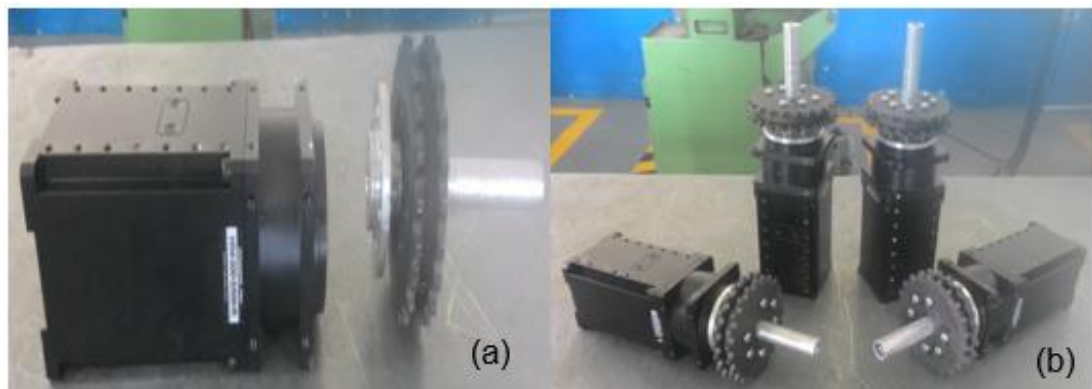
## 2.10 Ensamblaje de la plataforma móvil

Una vez pintados todos los componentes que forman parte de la plataforma se encuentran listos para ser ensamblados. En la figura 71 se observa la estructura base sobre la cual se incorporan los elementos.



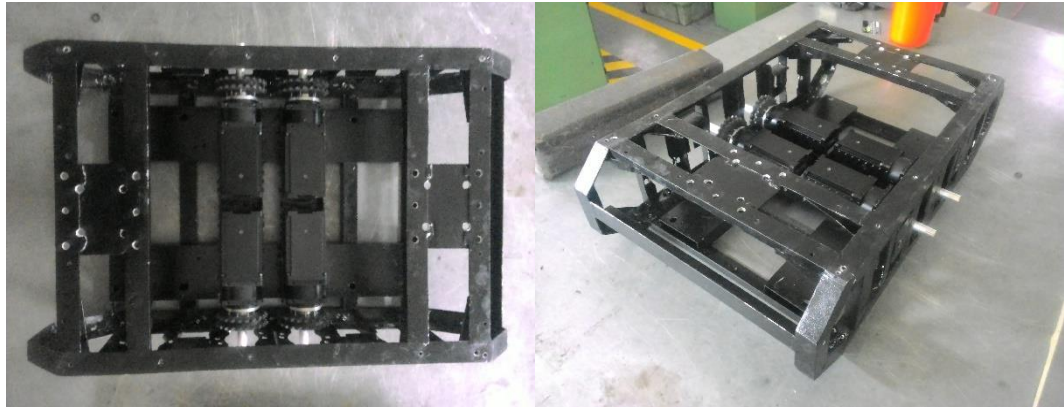
**Figura 75 Estructura base**

A continuación se unen las catarinas al eje del motor para conseguir un solo elemento, seguidamente se acoplan al motor por medio de pernos que atraviesan las catarinas y se enroscan en el motor.



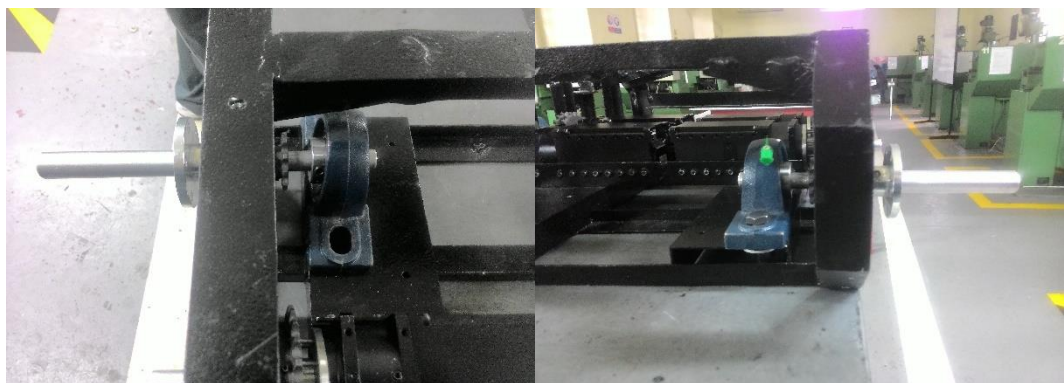
**Figura 76 a) Eje del motor acoplado a catarina, b) Motores ensamblados**

Una vez que se tienen los motores ensamblados se colocan en la estructura base sujetos a los perfiles en U por medio de pernos M3 de cabeza hexagonal.

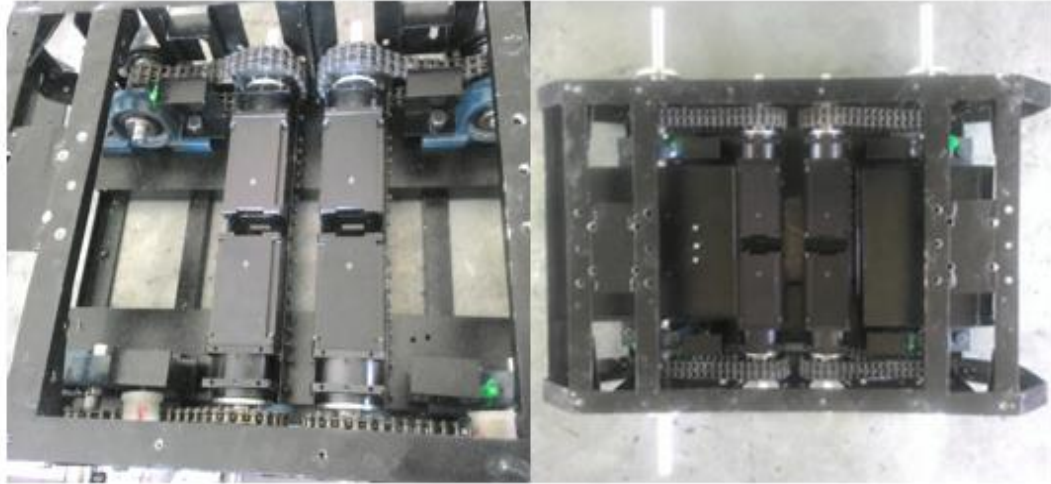


**Figura 77 Ensamblaje de los motores en la estructura base**

El paso siguiente consiste en incorporar los ejes de las ruedas con los piñones, chumaceras de pared y hubs en los extremos destinados para su operación, las chumaceras de piso se colocan sobre el perfil negro en U y sirven de soporte a los ejes de las ruedas. A continuación se colocan las cadenas sobre las catarinas y los piñones.

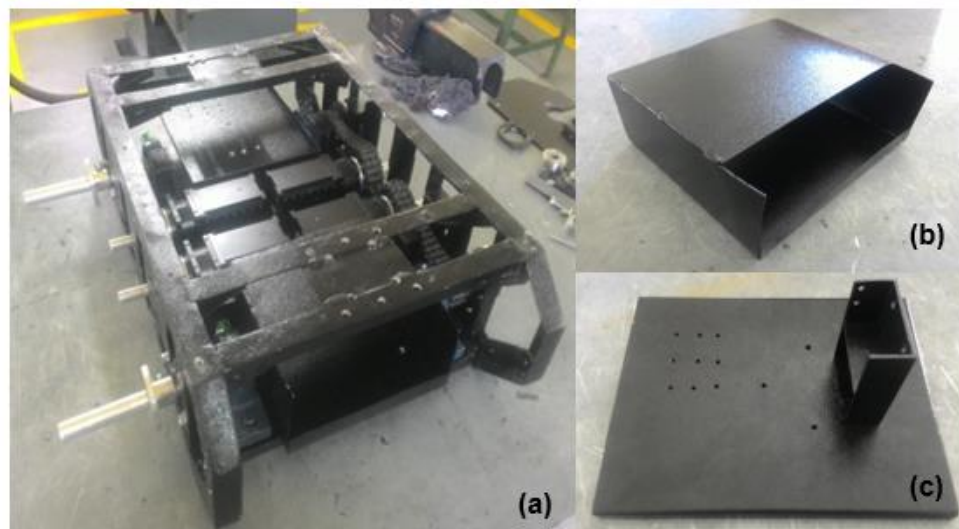


**Figura 78 Ensamblaje de los ejes de la rueda y chumaceras de piso**



**Figura 79 Montaje de las cadenas**

Se incorpora la caja que aloja a las baterías y el soporte donde va asentada la Pc industrial.



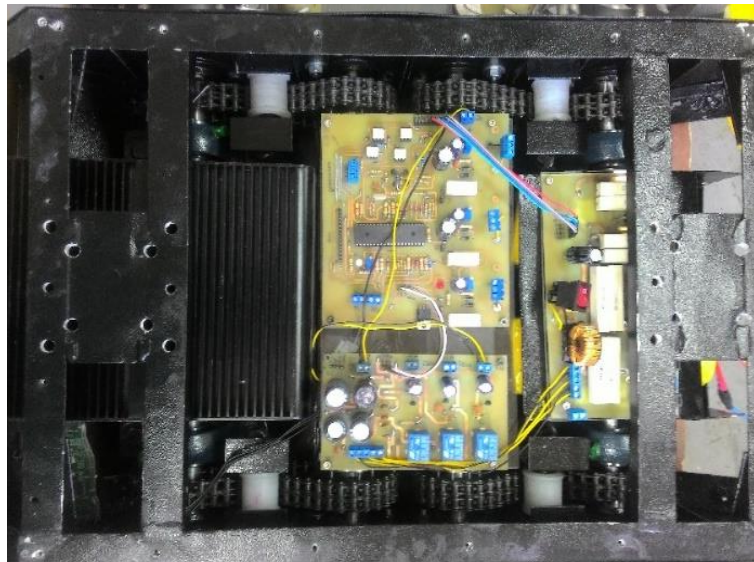
**Figura 80 a) Montaje de la caja de baterías y soporte de la Pc, b) Caja de baterías, c) Soporte de Pc**

Se montan las tapas laterales seguidos de los tensores y se ajustan de manera que las cadenas queden tensas y así asegurar el mínimo juego en la transmisión.



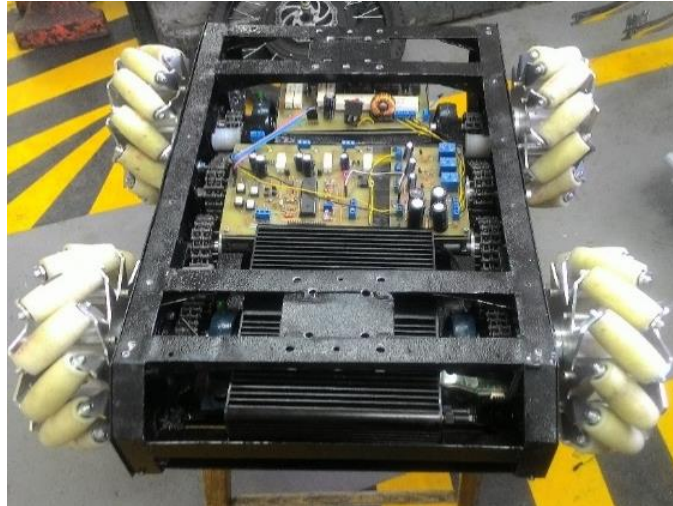
**Figura 81 Montaje de placas laterales y sensores**

Una vez ensamblados los elementos de la transmisión, los ejes y los soportes, se realiza el montaje de las placas de control, la Pc industrial, las baterías y las llantas omnidireccionales en configuración AB (Anexo E).



**Figura 82 Montaje de placas de control, Pc y baterías**





**Figura 83 Montaje de las llantas omnidireccionales**

Finalmente, se colocan las tapas superior, inferior, delantera y posterior, el interruptor de encendido y la placa de acrílico en la tapa superior que permite visualizar las placas de control dentro de la plataforma.



**Figura 84 Ensamblaje final de la plataforma móvil omnidireccional**

## CAPÍTULO III

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Para corroborar la maniobrabilidad de la plataforma móvil omnidireccional se presentan a continuación una serie de pruebas del funcionamiento. Se han tomado como referencia tres tipos de pisos sobre los cuales se desplaza la plataforma debido al material y la adherencia de las ruedas omnidireccionales, se evidencian las distintas direcciones en las cuales se puede mover el robot móvil, verificando la característica propia de un sistema de tracción omnidireccional.

#### **3.1 Movimiento omnidireccional de la plataforma robótica.**

La plataforma móvil tiene la capacidad de desplazarse linealmente en un rango de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  y puede alcanzar una velocidad máxima de 0.62 m/s. Las velocidades para cada motor vienen dadas por la ecuación 1.20 descrita en la sección 1.9.3 del capítulo I, esta ecuación permite el movimiento de la plataforma a diferentes ángulos demostrando así la característica predominante de las ruedas omnidireccionales.

El movimiento de la plataforma se encuentra relacionada con dos marcos de referencia, el primero, un marco global con un eje de coordenadas general y que permite describir la posición y velocidad de la plataforma y, el segundo, un marco de referencia propio de la plataforma con centro en la mitad de la misma siendo posible realizar un seguimiento del punto centro.

#### **3.2 Pruebas de funcionamiento**

Para evaluar la maniobrabilidad de la plataforma omnidireccional se realizan pruebas en tres tipos de pisos, concreto pulido, cemento y mármol. Las pruebas constan de 2 fases, la primera incluye el seguimiento de una trayectoria establecida por el usuario para evaluar el margen de desviación respecto a la trayectoria asignada, la segunda etapa emplea 5 cargas distintas en las que se va asignando un peso progresivo de 10kg hasta llegar a un máximo de 40kg, se evalúa el comportamiento y la capacidad de carga de la

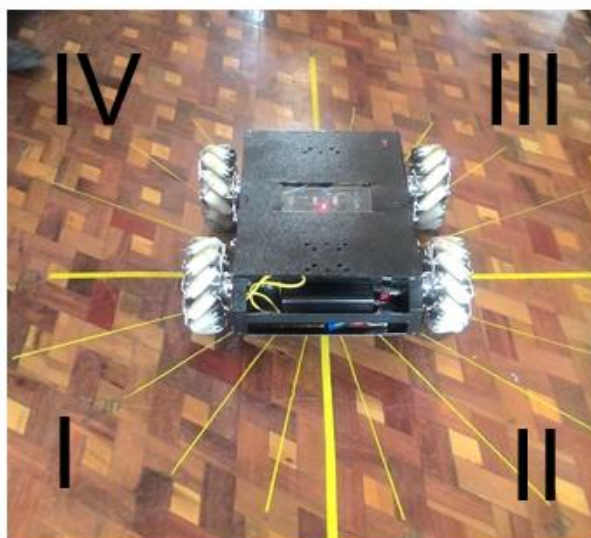
plataforma móvil a tres velocidades establecidas, una velocidad baja de 0.2m/s, una media de 0.4m/s y la máxima de 0.62m/s. De igual manera, se verifica la máxima velocidad angular del conjunto 1.458rad/s y se realizan pruebas con intervalos de 0.2rad/s comprobando los datos mostrados por el programa de control.

### 3.2.1 Pruebas de trayectoria

#### a. Parquet de madera

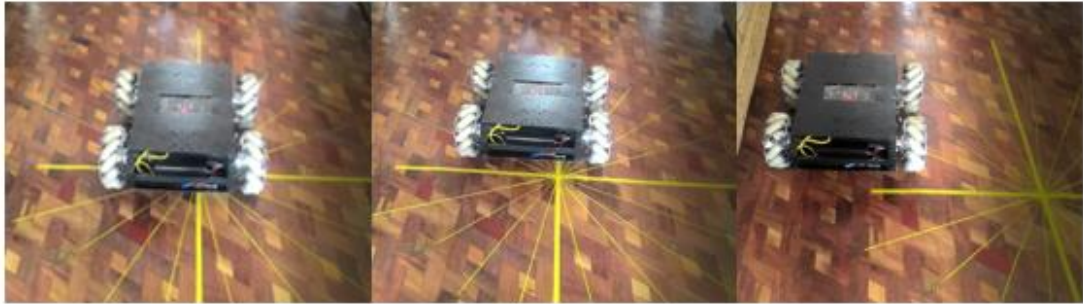
Para corroborar la maniobrabilidad de la plataforma se realizaron pruebas de movimiento para diferentes grados dentro del rango establecido, el piso de prueba es un parquet de madera, el principal problema radica en el deslizamiento de las ruedas sobre el piso, se puede notar un ligero corrimiento lo que hace que el funcionamiento y la maniobrabilidad de la plataforma no sean las adecuadas, por ende las pruebas realizadas muestran algunos errores respecto a la divergencia del movimiento lineal esperado.

Para una mejor percepción del desplazamiento se trazó sobre el piso un eje de referencia en color amarillo, se hicieron divisiones de  $20^\circ$  en cada cuadrante siendo posible visualizar aproximadamente el ángulo de desplazamiento de la plataforma.



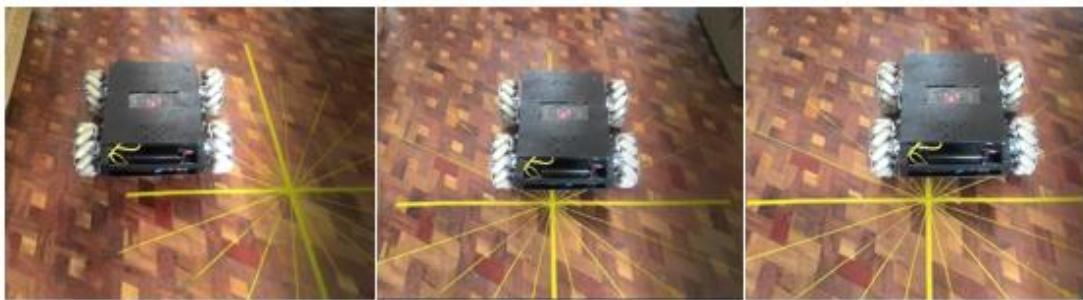
**Figura 85** Plataforma móvil omnidireccional sobre parquet de madera

En la figura 75 se aprecia un desplazamiento lineal a  $0^\circ$  desde el origen trazado como referencia, cuando el movimiento comienza se visualiza un ligero corrimiento de la plataforma hacia atrás y posterior continúa el movimiento asignado de manera normal.



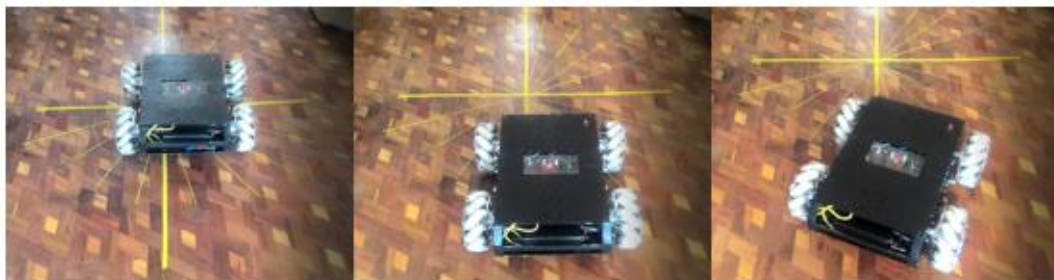
**Figura 86 Desplazamiento de la plataforma a  $0^\circ$**

El siguiente ángulo de prueba es de  $180^\circ$  respecto al sistema, son movimientos continuos a los anteriores y se puede ver que la plataforma no presenta un deslizamiento visible al momento de recorrer el piso con el ángulo asignado, llegando a su punto de destino en forma correcta.



**Figura 87 Desplazamiento de la plataforma a  $180^\circ$**

El movimiento continuo prosigue con un ángulo de desplazamiento a  $90^\circ$ , la plataforma responde de manera satisfactoria y cuando alcanza cierta distancia de recorrido se produce una rotación en sentido de las manecillas del reloj con un corrimiento despreciable.



**Figura 88 Desplazamiento de la plataforma a 90° y rotación en sentido horario**

La plataforma se posiciona en el centro del sistema de referencia con un ángulo de desplazamiento de 240°, (movimiento en el III cuadrante), como se visualiza en la figura 79.



**Figura 89 Desplazamiento de la plataforma a 240°**

Se posiciona nuevamente la plataforma en el centro del sistema de referencia y se asigna como quinto ángulo de prueba 60°, la plataforma se desliza en el primer cuadrante. El corrimiento es casi despreciable.



**Figura 90 Desplazamiento de la plataforma a 60°**

En el segundo cuadrante con un ángulo de  $160^\circ$  se visualiza el movimiento muy cercano a la línea de los  $180^\circ$ , por lo que se evidencia que la ecuación a la cual responde el control está bien desarrollada. Existe un ligero corrimiento de las ruedas.



**Figura 91 Desplazamiento de la plataforma a  $160^\circ$**

Para finalizar se realiza un desplazamiento a  $300^\circ$ , la plataforma no se encuentra en el centro del eje de referencia, está ubicada ligeramente a la izquierda del mismo, por lo tanto, su desplazamiento no se verifica sobre la línea trazada para  $300^\circ$  pero si se visualiza la abertura aproximada del ángulo asignado.



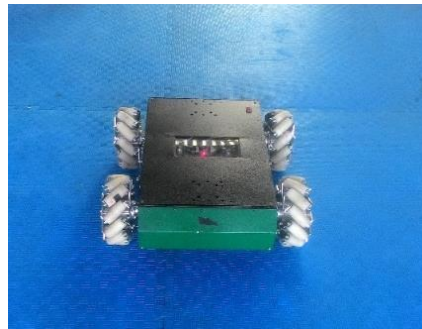
**Figura 92 Desplazamiento de la plataforma a  $300^\circ$**

#### **b. Piso de goma**

El piso de goma conocido como tatami se utiliza en el entrenamiento de artes marciales. Este tipo de suelo permite mayor adherencia de las ruedas de nylon y minimiza el corrimiento presentado en el parquet, de igual

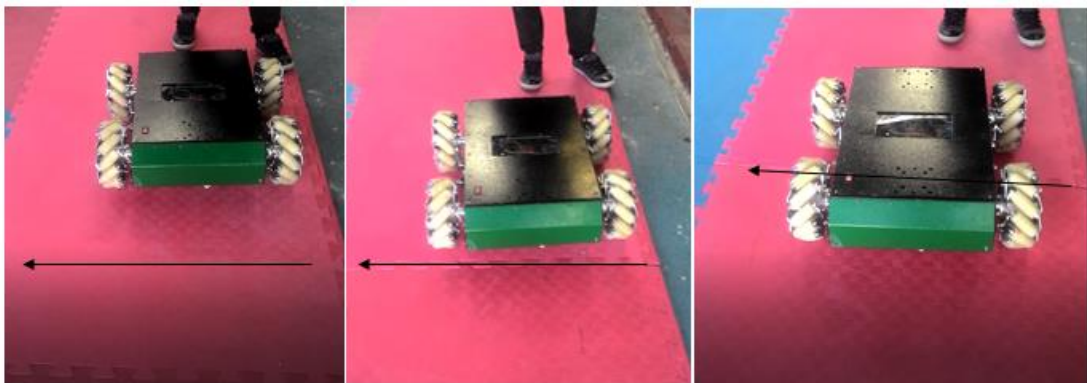
manera en los cambios de dirección el deslizamiento en las llantas es despreciable.

Las pruebas consisten básicamente en desplazar la plataforma a lo largo del piso de goma, variar los ángulos de operación para visualizar el movimiento diagonal y verificar que se minimiza considerablemente el corrimiento de las ruedas omnidireccionales.



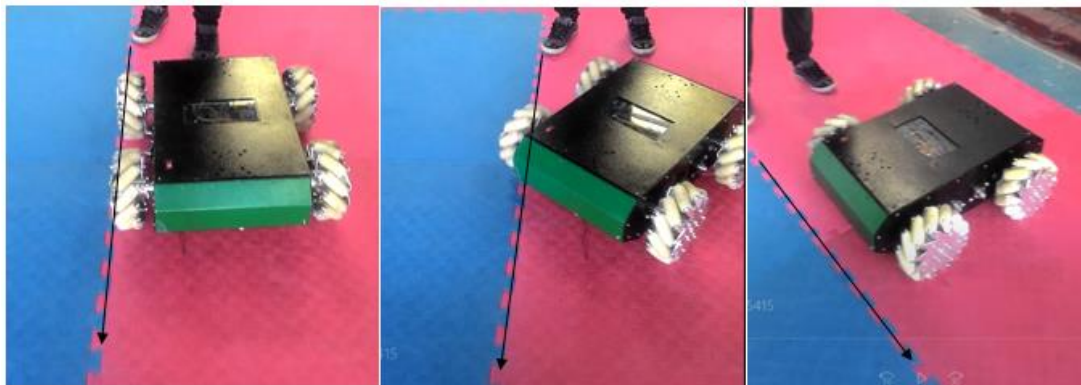
**Figura 93 Plataforma móvil omnidireccional sobre piso de goma (tatami)**

La prueba comienza con el movimiento a  $90^\circ$  de la plataforma, una línea negra de referencia ayuda a identificar la posición del robot móvil.



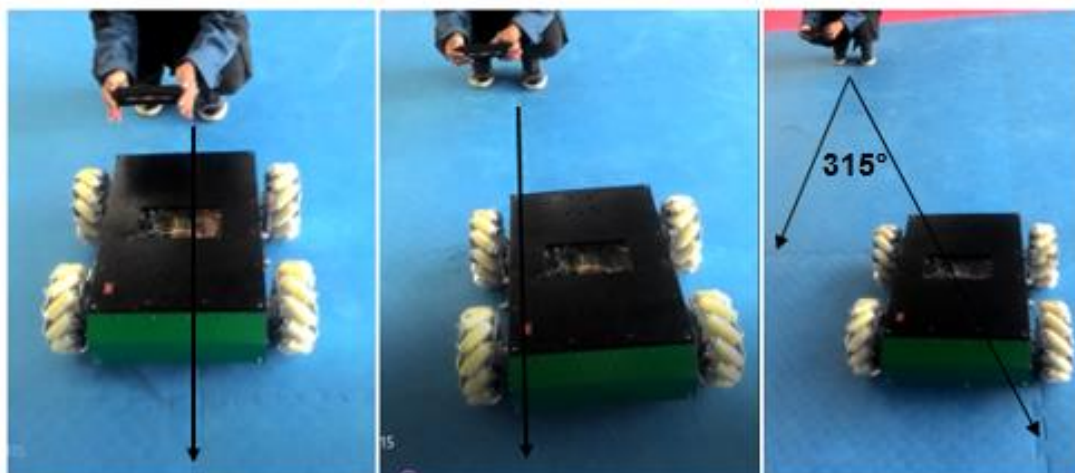
**Figura 94 Desplazamiento de la plataforma a  $90^\circ$**

Se rota la plataforma en sentido horario y se puede ver como se posiciona perfectamente sobre el piso.



**Figura 95 Rotación horaria de la plataforma**

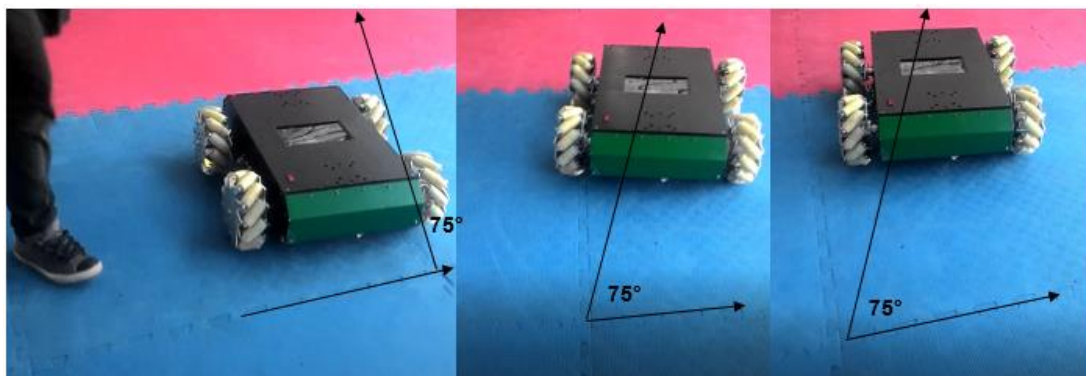
La figura 88 muestra un ángulo de desplazamiento de  $315^\circ$  respecto al centro de la plataforma, es posible identificar el camino que recorre el robot móvil con una abertura muy cercana a la asignada.



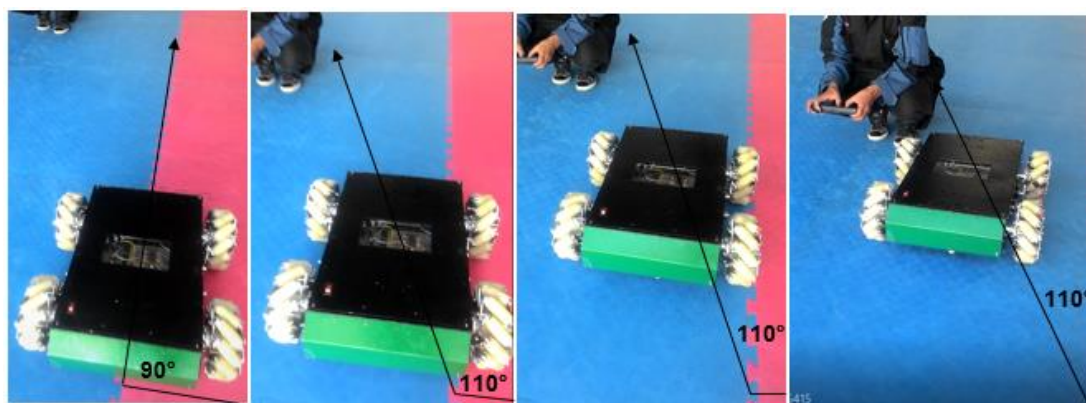
**Figura 96 Desplazamiento de la plataforma a  $315^\circ$**

En las figuras siguientes me muestran una serie de pruebas con ángulos en diferentes cuadrantes y se realiza el seguimiento a través de una línea de referencia que demuestra una precisión aceptable del desplazamiento omnidireccional.

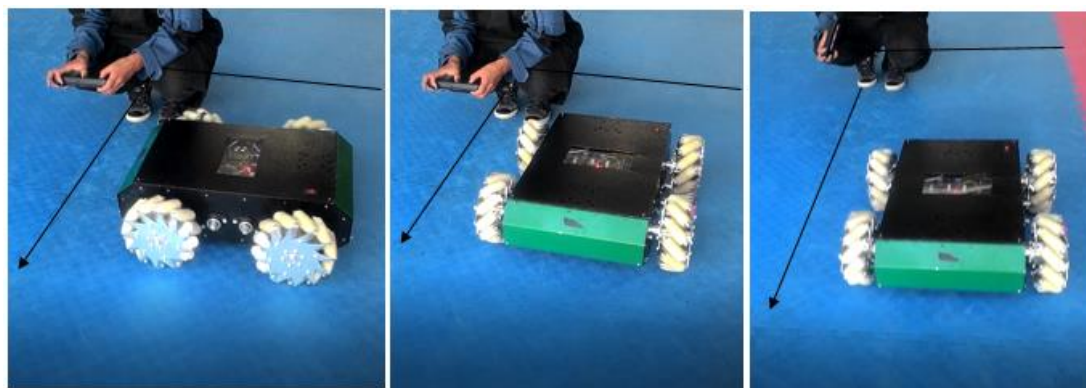




**Figura 97 Desplazamiento de la plataforma a 75°**



**Figura 98 Desplazamiento de la plataforma a 110°**



**Figura 99 Rotación anti horaria de la plataforma**

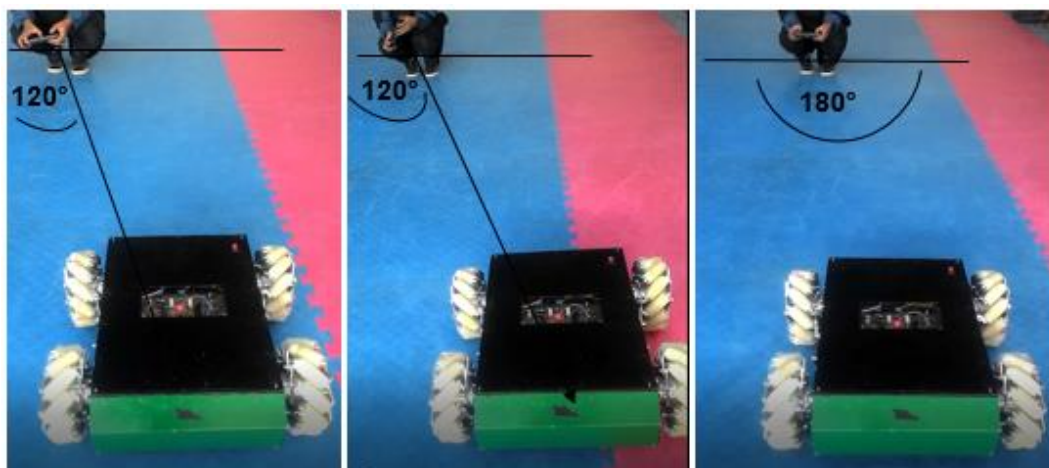


Figura 100 Desplazamiento de la plataforma a 120° y retorno a 180°

c. Desviación de trayectoria

Tabla 12

Margen de desviación de trayectoria

| DESVIACIÓN DE TRAYECTORIA (mm) |            |            |                 |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |
|--------------------------------|------------|------------|-----------------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
|                                | Piso       | Carga (kg) | 0 kg            |          |         | 10 kg    |          |         | 20 kg    |          |         | 30 kg    |          |         | 40 kg    |          |         |          |
|                                |            |            | Velocidad (m/s) | Vertical | Lateral | Diagonal | Vertical | Lateral | Diagonal | Vertical | Lateral | Diagonal | Vertical | Lateral | Diagonal | Vertical | Lateral | Diagonal |
| Concreto pulido                | Movimiento | 0.2        | 5               | 2        | 4       | 0        | 11       | 10      | 13       | 9        | 5       | 6        | 3        | 5       | 5        | 6        | 5       |          |
|                                |            |            | 0.4             | 6        | 3       | 3        | 8        | 30      | 5        | 15       | 27      | 10       | 3        | 9       | 10       | 6        | 10      | 10       |
|                                |            |            | 0.62            | 31       | 25      | 0        | 32       | 5       | 10       | 4        | 6       | 10       | 30       | 30      | 10       | 31       | 30      | 10       |
| Mármol                         | Movimiento | 0.2        | 10              | 5        | 5       | 3        | 10       | 3       | 5        | 5        | 4       | 4        | 5        | 5       | 5        | 5        | 15      |          |
|                                |            |            | 0.4             | 15       | 4       | 5        | 10       | 5       | 4        | 10       | 5       | 8        | 3        | 7       | 15       | 20       | 10      | 5        |
|                                |            |            | 0.62            | 30       | 15      | 5        | 40       | 25      | 5        | 40       | 20      | 10       | 24       | 15      | 20       | 40       | 10      | 10       |
| Concreto                       | Movimiento | 0.2        | 5               | 7        | 10      | 2        | 6        | 10      | 10       | 6        | 10      | 6        | 8        | 5       | 5        | 8        | 15      |          |
|                                |            |            | 0.4             | 7        | 13      | 5        | 5        | 10      | 5        | 7        | 9       | 10       | 4        | 12      | 5        | 10       | 7       | 10       |
|                                |            |            | 0.62            | 10       | 9       | 5        | 10       | 3       | 15       | 15       | 0       | 10       | 20       | 12      | 5        | 20       | 5       | 10       |

Se aprecia que el margen de error presentado no supera los 50 mm de desviación en ninguna de las etapas de prueba de los diferentes pisos, por lo que se considera aceptable el seguimiento de una trayectoria propuesta por el usuario.

La carga asignada no influye mayormente en el desempeño de la plataforma ni en su correcto funcionamiento. El corrimiento se aprecia menor cuando la plataforma lleva más peso, se puede deber a que las ruedas se adhieren de mejor manera al piso por la carga situada sobre ella lo que provoca que disminuya el deslizamiento en las llantas omnidireccionales de nylon.

Las pruebas se realizaron de forma experimental haciendo uso de un flexómetro y una cinta métrica, siendo probable que los resultados varíen pero no de manera significativa.

### 3.2.2 Pruebas de velocidad lineal y maniobrabilidad con carga

En la tabla 13 se observan los datos obtenidos al probar la plataforma en un piso de concreto pulido.

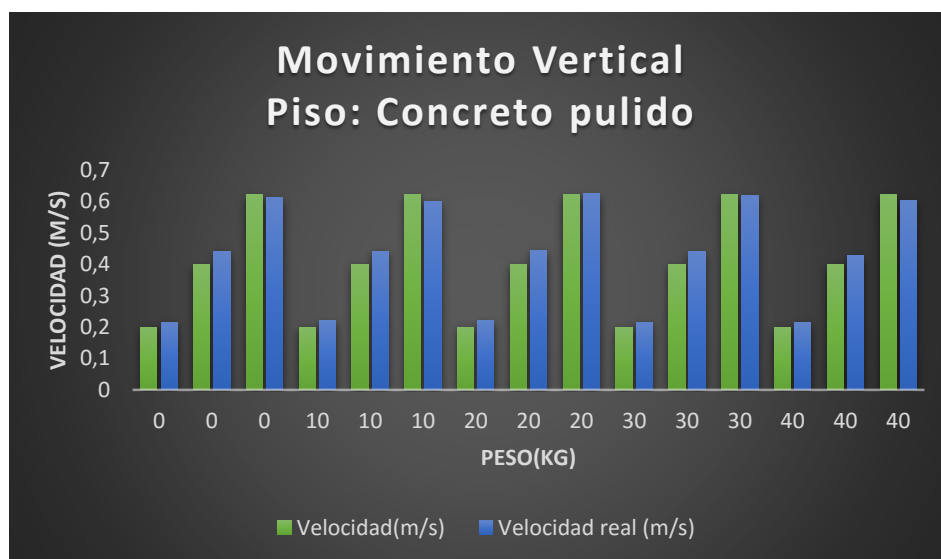
**Tabla 13**

**Piso de prueba: Concreto Pulido**

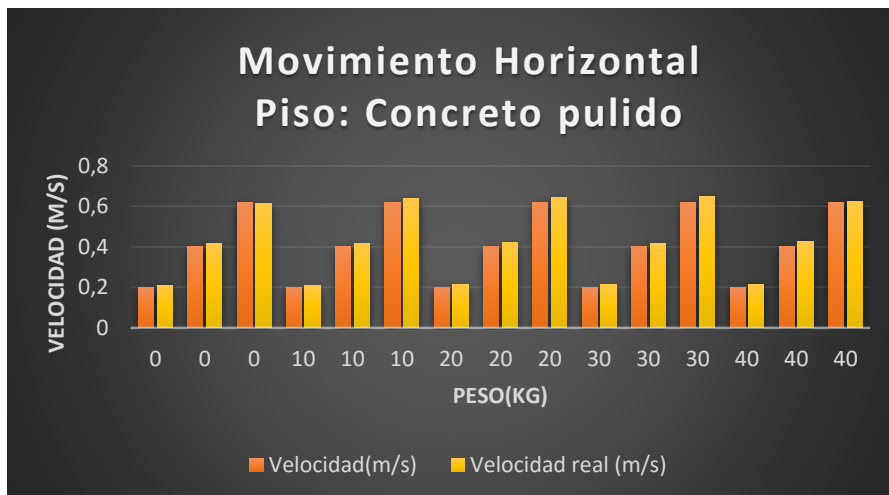
| Piso: Concreto Pulido - Distancia (5 m) |                          |            |                      |            |                      |            |                      |
|---|--------------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|
| Peso (kg)                               | Velocidad asignada (m/s) | Tiempo (s) | Velocidad real (m/s) | Tiempo (s) | Velocidad real (m/s) | Tiempo (s) | Velocidad real (m/s) |
| 0                                       | 0,2                      | 23,13      | 0,216                | 23,76      | 0,210                | 22,84      | 0,219                |
| 0                                       | 0,4                      | 11,34      | 0,441                | 11,98      | 0,417                | 12,2       | 0,410                |
| 0                                       | 0,62                     | 8,16       | 0,613                | 8,11       | 0,617                | 8,2        | 0,610                |
| 10                                      | 0,2                      | 22,7       | 0,220                | 24         | 0,208                | 22,44      | 0,223                |

CONTINÚA 

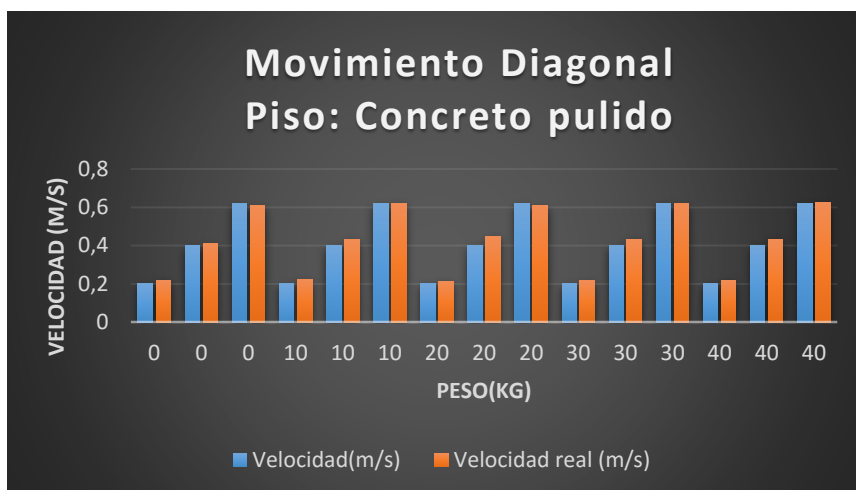
|           |      |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>10</b> | 0,4  | 11,34 | 0,441 | 12,01 | 0,416 | 11,6  | 0,431 |
| <b>10</b> | 0,62 | 8,33  | 0,600 | 7,85  | 0,637 | 8,05  | 0,621 |
| <b>20</b> | 0,2  | 22,77 | 0,220 | 23,44 | 0,213 | 23,4  | 0,214 |
| <b>20</b> | 0,4  | 11,3  | 0,442 | 11,86 | 0,422 | 11,21 | 0,446 |
| <b>20</b> | 0,62 | 8     | 0,625 | 7,8   | 0,641 | 8,2   | 0,610 |
| <b>30</b> | 0,2  | 23,11 | 0,216 | 23,59 | 0,212 | 23,23 | 0,215 |
| <b>30</b> | 0,4  | 11,39 | 0,439 | 11,96 | 0,418 | 11,54 | 0,433 |
| <b>30</b> | 0,62 | 8,1   | 0,617 | 7,71  | 0,649 | 8,1   | 0,617 |
| <b>40</b> | 0,2  | 23,2  | 0,216 | 23,1  | 0,216 | 22,79 | 0,219 |
| <b>40</b> | 0,4  | 11,7  | 0,427 | 11,75 | 0,426 | 11,52 | 0,434 |
| <b>40</b> | 0,62 | 8,3   | 0,602 | 8     | 0,625 | 8,01  | 0,624 |



**Figura 101 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical**



**Figura 102 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento horizontal**



**Figura 103 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento diagonal**

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 13 y en las figuras 97, 98 y 99 se aprecia que la variación entre la velocidad lineal real y la asignada no difiere considerablemente. Se mantiene dentro del margen ingresado y varía únicamente por centésimas.

En la tabla 14 se muestran los datos obtenidos al probar la plataforma en piso de mármol.

Tabla 14

Piso de prueba: Mármol

| Piso Mármol     |                    |            |                      |            |                      |           |                      |
|-----------------|--------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|
| Distancia (5 m) |                    | Vertical   |                      | Horizontal |                      | Diagonal  |                      |
| Peso (kg)       | Velocidad asignada | Tiempo (s) | Velocidad real (m/s) | Tiempo(s)  | Velocidad real (m/s) | Tiempo(s) | Velocidad real (m/s) |
|                 | 0                  | 0,2        | 27,56                | 0,216      | 28,73                | 0,207     | 27,6                 |
| 0               | 0,4                | 13,79      | 0,431                | 13,5       | 0,441                | 13,1      | 0,454                |
| 0               | 0,62               | 9,49       | 0,627                | 9,45       | 0,630                | 10,55     | 0,564                |
| 10              | 0,2                | 27,32      | 0,218                | 28,79      | 0,207                | 27,88     | 0,213                |
| 10              | 0,4                | 13,83      | 0,430                | 13,7       | 0,434                | 13,5      | 0,441                |
| 10              | 0,62               | 9,4        | 0,633                | 9,5        | 0,626                | 9,9       | 0,601                |
| 20              | 0,2                | 27,7       | 0,215                | 28,05      | 0,212                | 27,9      | 0,213                |
| 20              | 0,4                | 13,8       | 0,431                | 13,8       | 0,431                | 13,6      | 0,438                |
| 20              | 0,62               | 9,51       | 0,626                | 9,56       | 0,622                | 9,59      | 0,620                |
| 30              | 0,2                | 27,59      | 0,216                | 28,36      | 0,210                | 27,37     | 0,217                |
| 30              | 0,4                | 13,9       | 0,428                | 13,75      | 0,433                | 13,2      | 0,451                |
| 30              | 0,62               | 9,65       | 0,617                | 9,51       | 0,626                | 8,52      | 0,698                |
| 40              | 0,2                | 27,49      | 0,216                | 27,95      | 0,213                | 27,37     | 0,217                |
| 40              | 0,4                | 13,65      | 0,436                | 13,95      | 0,427                | 13,8      | 0,431                |
| 40              | 0,62               | 8,3        | 0,602                | 8          | 0,625                | 8,01      | 0,624                |

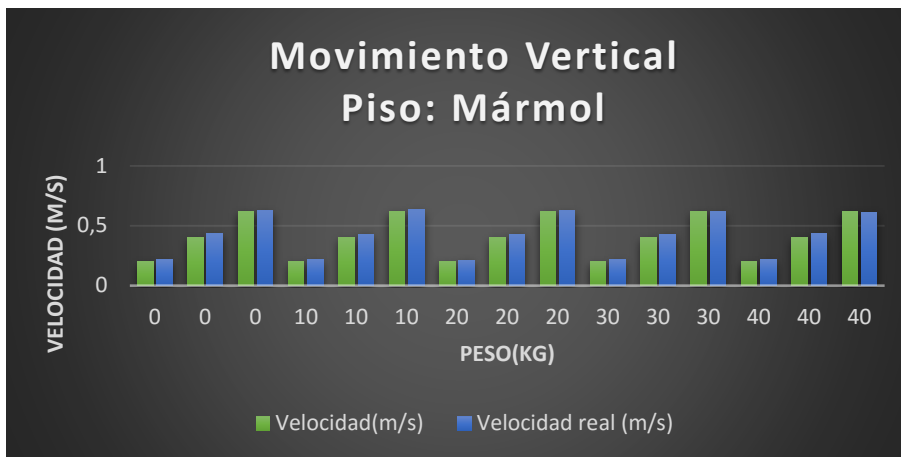


Figura 104 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical

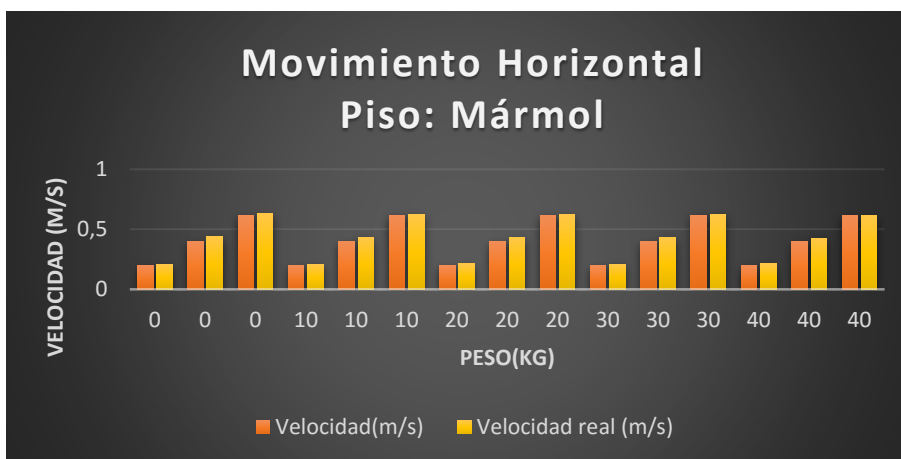


Figura 105 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento horizontal

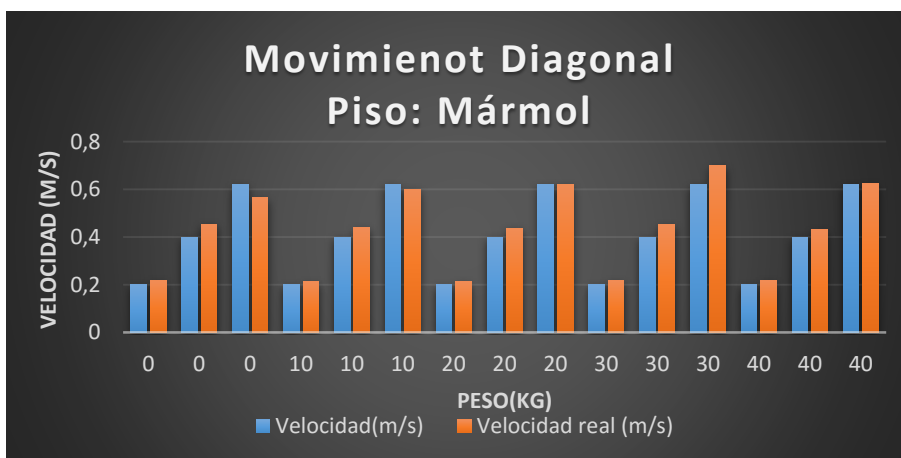


Figura 106 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento diagonal

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 14 y en las figuras 100, 101 y 102 se aprecia de igual manera que la variación entre la velocidad lineal real y la asignada no difiere considerablemente. Se mantiene dentro del margen ingresado y varía únicamente por centésimas.

En la tabla 15, se presentan los datos obtenidos en la prueba para un piso de concreto.

**Tabla 15**  
**Piso de prueba: Concreto**

| Piso Concreto   |                    |            |                      |            |                      |           |                      |
|-----------------|--------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|
| Distancia (5 m) |                    | Vertical   |                      | Horizontal |                      | Diagonal  |                      |
| Peso (kg)       | Velocidad asignada | Tiempo (s) | Velocidad real (m/s) | Tiempo(s)  | Velocidad real (m/s) | Tiempo(s) | Velocidad real (m/s) |
| 0               | 0,2                | 23,8       | 0,210                | 23,84      | 0,210                | 23,94     | 0,209                |
| 0               | 0,4                | 11,8       | 0,424                | 11,98      | 0,417                | 12,11     | 0,413                |
| 0               | 0,62               | 8,12       | 0,616                | 8,11       | 0,617                | 8,14      | 0,614                |
| 10              | 0,2                | 24         | 0,208                | 24,3       | 0,206                | 24,07     | 0,208                |
| 10              | 0,4                | 11,81      | 0,423                | 12         | 0,417                | 12        | 0,417                |
| 10              | 0,62               | 8,2        | 0,610                | 8,2        | 0,610                | 8,09      | 0,618                |
| 20              | 0,2                | 24,2       | 0,207                | 24,35      | 0,205                | 24,23     | 0,206                |
| 20              | 0,4                | 11,9       | 0,420                | 12,12      | 0,413                | 12,15     | 0,412                |
| 20              | 0,62               | 8,26       | 0,605                | 8,24       | 0,607                | 8,21      | 0,609                |
| 30              | 0,2                | 24,28      | 0,206                | 24,38      | 0,205                | 24,41     | 0,205                |
| 30              | 0,4                | 11,9       | 0,420                | 12,27      | 0,407                | 12,31     | 0,406                |
| 30              | 0,62               | 8,3        | 0,602                | 8,3        | 0,602                | 8, 2      | 0,610                |





|    |      |      |       |      |       |       |       |
|----|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 40 | 0,2  | 24,2 | 0,207 | 24,5 | 0,204 | 24,51 | 0,204 |
| 40 | 0,4  | 12   | 0,417 | 12,4 | 0,403 | 12,34 | 0,405 |
| 40 | 0,62 | 8,3  | 0,602 | 8,33 | 0,600 | 8,3   | 0,602 |

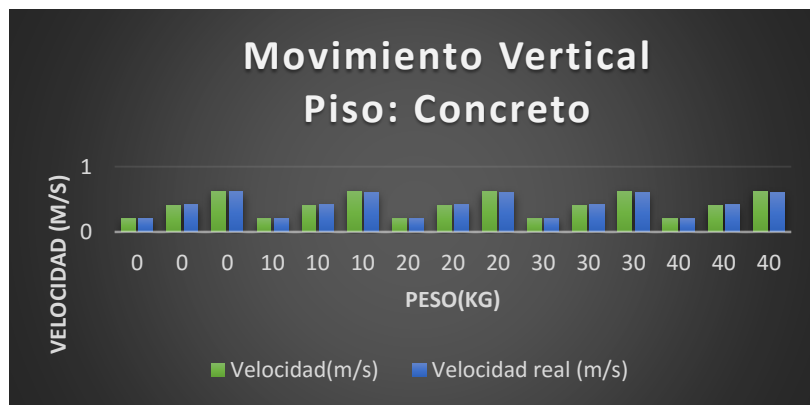


Figura 107 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical

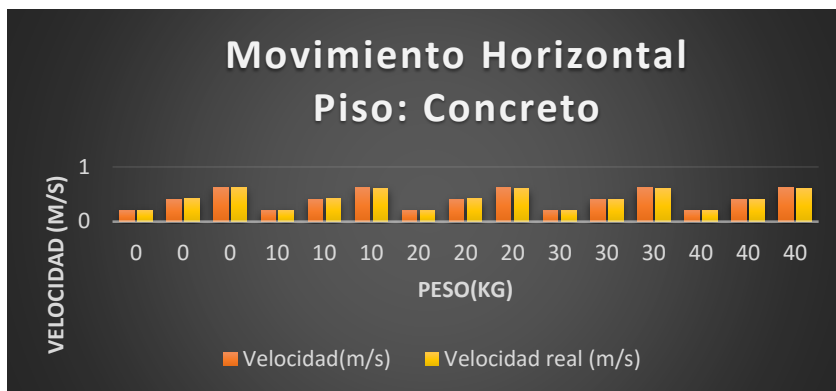


Figura 108 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento horizontal

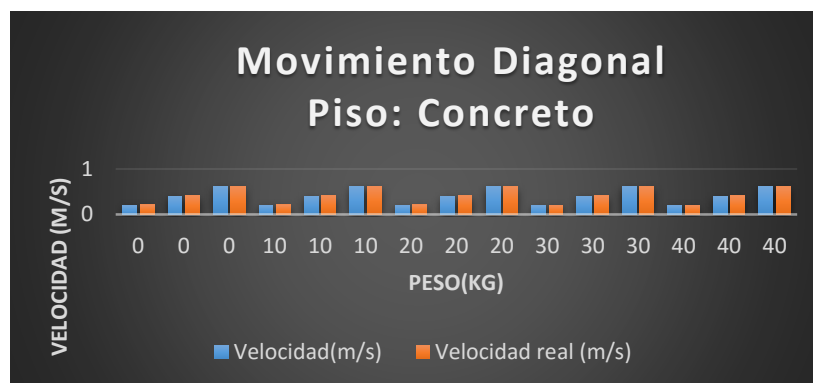


Figura 109 Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento diagonal

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 15 y en las figuras 103, 104 y 105 se obtiene el mismo resultado, la variación entre la velocidad lineal real y la asignada no difiere considerablemente. Se mantiene dentro del margen ingresado y varía únicamente por centésimas.

En las tablas y figuras mostradas anteriormente se observa que los valores de la velocidad asignada y la velocidad real son muy próximos a los esperados demostrando un correcto funcionamiento del control de la plataforma.

**Tabla 16**  
**Error porcentual de la velocidad lineal**

| ERROR PORCENTUAL |                 |      |      |           |      |      |          |       |      |
|------------------|-----------------|------|------|-----------|------|------|----------|-------|------|
| Piso             | Concreto Pulido |      |      | Mármol    |      |      | Concreto |       |      |
| Carga (kg)       | VERTICAL        |      |      | HORIZNTAL |      |      | DIAGONAL |       |      |
| 0                | 7,48            | 7,36 | 4,80 | 4,96      | 3,43 | 4,64 | 8,64     | 7,23  | 4,24 |
| 0                | 9,28            | 7,29 | 5,60 | 4,16      | 9,24 | 4,16 | 2,40     | 11,93 | 3,12 |
| 0                | 1,18            | 1,11 | 0,69 | 0,56      | 1,53 | 0,56 | 1,68     | 9,93  | 0,94 |
| 10               | 9,20            | 8,17 | 4,00 | 4,00      | 3,23 | 2,80 | 10,24    | 6,29  | 3,72 |
| 10               | 9,28            | 7,03 | 5,52 | 3,92      | 7,90 | 4,00 | 7,20     | 9,24  | 4,00 |
| 10               | 3,29            | 2,05 | 1,68 | 2,66      | 1,01 | 1,68 | 0,18     | 3,16  | 0,32 |
| 20               | 8,92            | 6,89 | 3,20 | 6,24      | 5,71 | 2,60 | 6,40     | 6,22  | 3,08 |
| 20               | 9,60            | 7,23 | 4,80 | 5,12      | 7,23 | 3,04 | 10,32    | 8,57  | 2,80 |
| 20               | 0,80            | 0,90 | 2,42 | 3,28      | 0,38 | 2,18 | 1,68     | 0,07  | 1,80 |
| 30               | 7,56            | 7,26 | 2,88 | 5,64      | 4,67 | 2,48 | 7,08     | 8,00  | 2,36 |
| 30               | 8,88            | 6,55 | 4,80 | 4,32      | 7,56 | 1,84 | 7,68     | 11,26 | 1,52 |
| 30               | 0,44            | 0,55 | 2,92 | 4,40      | 0,90 | 2,92 | 0,44     | 11,22 | 1,68 |
| 40               | 7,20            | 7,60 | 3,20 | 7,60      | 6,05 | 2,00 | 8,84     | 8,00  | 1,96 |
| 40               | 6,40            | 8,24 | 4,00 | 6,00      | 6,22 | 0,80 | 7,84     | 7,23  | 1,28 |
| 40               | 2,92            | 1,08 | 2,92 | 0,80      | 0,55 | 3,29 | 0,68     | 0,38  | 2,92 |

En la tabla 16 se exhibe el error porcentual para cada caso de prueba, si bien se visualiza que la desviación entre velocidades es pequeña se presentan errores sobre el 10% en pocos casos, esto se debe a la diferencia de centésimas respecto al valor esperado al considerar valores bajos. El máximo error que se registra para el movimiento vertical es 9.60%, para el movimiento horizontal es 9.24% y para el movimiento diagonal es 11.93%.

### 3.2.3 Pruebas de velocidad angular de la plataforma omnidireccional

La velocidad lineal máxima a la que llega la plataforma es de 0.62 m/s, valor que se encontró mediante las pruebas. De la misma manera se realizó pruebas para verificar la velocidad angular máxima que alcanza la plataforma y compararla con la calculada en la ecuación 2.23. de la sección 2.3.15 del capítulo II.

$$V_{real\ max} = 0.62 \frac{m}{s} \therefore \omega_{max\ plataforma} = 6.10 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{real\ max} = \frac{0.1016m}{4} \left\{ - \left( - \frac{6.1 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right) + \frac{6.1 \frac{rad}{s}}{0.425m} - \left( - \frac{6.1 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right) + \frac{6.1 \frac{rad}{s}}{0.425m} \right\}$$

$$\omega_{real\ max} = 1.458 \frac{rad}{s}$$

Por consiguiente, se observa que la velocidad angular máxima de la plataforma es de 1.458 rad/s, valor que supera al calculado de 1.396 rad/s en la sección 2.3.15, debido a la consideración de la velocidad lineal mediante pruebas. A continuación se presenta en la tabla 17 los resultados obtenidos.

**Tabla 17**

#### Datos de velocidad angular de la plataforma

| VELOCIDAD ANGULAR DE LA PLATAFORMA ( $\omega$ ) |            |                        |           |
|---|------------|------------------------|-----------|
| Velocidad asignada (rad/s)                      | Tiempo (s) | Velocidad real (rad/s) | Error (%) |
| 0.20  | 28.82      | 0.218                  | 8,26      |

CONTINÚA



|              |       |       |      |
|--------------|-------|-------|------|
| <b>0.40</b>  | 14.70 | 0.427 | 6,42 |
| <b>0.60</b>  | 9.96  | 0.631 | 4,89 |
| <b>0.80</b>  | 7.36  | 0.854 | 6,29 |
| <b>1.00</b>  | 6.00  | 1.047 | 4,51 |
| <b>1.20</b>  | 4.83  | 1.301 | 7,75 |
| <b>1.40</b>  | 4.45  | 1.412 | 0,85 |
| <b>1.458</b> | 4.32  | 1.454 | 0,24 |

La tabla 17 muestra los valores de prueba para la velocidad angular de la plataforma omnidireccional, se aprecia una variación muy pequeña respecto a los resultados esperados, por lo que, se considera el control como adecuado.

### 3.2.4 Pruebas de maniobrabilidad

**Tabla 18**

#### Tiempo de ejecución en pista de obstáculos

| MANIOBRABILIDAD EN PISTA DE OBSTÁCULOS |                         |                  |                             |                         |  |
|--|-------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|--|
| Velocidad (m/s)                        | Distancia recorrida (m) | N° de obstáculos | Distancia de separación (m) | Tiempo de ejecución (s) | Movimientos combinados                   |
| <b>0.30</b>                            | 14                      | 14               | 1                           | 85                      | Vertical, lateral, diagonal y rotacional |
| <b>0.62</b>                            | 14                      | 14               | 1                           | 48                      | Vertical, lateral, diagonal y rotacional |

En la figura 101 se observa la pista de obstáculos en la que realizó las pruebas de maniobrabilidad, la cual consistió en evadir obstáculos dispuestos entre sí con dos distintas velocidades cuyos resultados. La figura 102 muestra a la plataforma en medio de la prueba, ejecutando movimientos diagonales con el fin de cumplir el objetivo.



**Figura 110 Pista de obstáculos**



**Figura 111 Evasión de obstáculos**

La tabla 18 presenta los resultados obtenidos al someter a la plataforma omnidireccional a una prueba en donde el objetivo fue evadir los obstáculos de manera eficiente y corroborar la capacidad de manejo de la plataforma verificando así la maniobrabilidad de acuerdo al tiempo, la distancia recorrida y los movimientos empleados.

Se colocaron 14 conos a manera de obstáculos separados a 1 metro de distancia entre sí en diferentes posiciones a lo largo de un piso de goma de 14 metros de longitud. Las velocidades de prueba fueron de 0.30 m/s y de 0.62 m/s, para el primer caso el tiempo de ejecución fue de 85 segundos superando los obstáculos sin ningún problema, para el segundo caso con la máxima velocidad el tiempo de ejecución fue de 48 segundos aproximadamente, sin embargo, la capacidad de reacción del operario disminuye un poco debido a la combinación de grados en los movimientos para evadir de forma más precisa y en menor tiempo cada obstáculo.

Finalmente, es posible verificar la maniobrabilidad de la plataforma al superar los obstáculos mediante los distintos movimientos en grados para su desplazamiento.

### **3.3 Validación de la hipótesis.**

#### **3.3.1 Planteamiento de la hipótesis**

El sistema de tracción omnidireccional permite un movimiento más maniobrable de la plataforma robótica.

#### **3.3.2 Validación de la hipótesis**

De acuerdo con los resultados presentados en las tablas 12,13, 14, 16 y 18 de la sección 3.2.2, la hipótesis es aceptada como cierta validando la maniobrabilidad de la plataforma móvil al realizarse pruebas satisfactorias en varias direcciones de movimiento.

### **3.4 Análisis Económico del proyecto.**

En esta sección se analizan los gastos generados en el desarrollo del proyecto, se detalla los componentes utilizados y su costo a excepción de los materiales proporcionados por el proyecto CEDIA.

**Tabla 19**  
**Costos del proyecto**

| <b>CANTIDAD</b>                       | <b>DETALLE</b>                     | <b>VALOR UNITARIO \$</b> | <b>VALOR TOTAL \$</b> |
|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| <b>Sistema Eléctrico y de control</b> |                                    |                          |                       |
| 3                                     | Baquelas doble cara                | 7,5                      | 22,5                  |
| 5                                     | Reguladores lm317k                 | 5                        | 25                    |
| 1                                     | Bobina                             | 5                        | 5                     |
| 1                                     | PIC 16f877a                        | 7                        | 7                     |
| 15                                    | Fusibles                           | 0,1                      | 1,5                   |
| 20                                    | Cables conexión                    | 0,15                     | 3                     |
| 4                                     | Metros de cable de timbre          | 0,3                      | 1,2                   |
| 1                                     | Metro de cable calibre 14          | 0,75                     | 0,75                  |
| 3                                     | Plugs                              | 0,4                      | 1,2                   |
| 6                                     | Plugs tipo banana                  | 0,5                      | 3                     |
| 12                                    | Borneras                           | 0,5                      | 6                     |
| 3                                     | Relés                              | 1,5                      | 4,5                   |
| 4                                     | 4n25                               | 1,25                     | 5                     |
| 4                                     | Disipadores de calor               | 2                        | 8                     |
| 1                                     | Zócalo de 40 pines                 | 0,75                     | 0,75                  |
| 4                                     | Zócalo de 6 pines                  | 0,5                      | 2                     |
| 2                                     | regleta espadines                  | 1,5                      | 3                     |
| 3                                     | Diodos 1n4148                      | 0,07                     | 0,21                  |
| 4                                     | Transistores 3904                  | 0,5                      | 2                     |
| 10                                    | Capacitores cerámicos 100nF        | 0,1                      | 1                     |
| 3                                     | Capacitores electrolíticos 2200 uF | 1,5                      | 4,5                   |

**CONTINÚA** 

|    |                                   |      |      |
|----|-----------------------------------|------|------|
| 6  | Capacitores electrolíticos 10 uF  | 0,45 | 2,7  |
| 3  | Capacitores electrolíticos 1000uF | 0,9  | 2,7  |
| 5  | Porta fusibles                    | 0,3  | 1,5  |
| 11 | Resistencias 0,22Ω                | 0,5  | 5,5  |
| 4  | Diodos 10A01                      | 0,8  | 3,2  |
| 2  | Switches                          | 1    | 2    |
| 6  | Diodos 1N4007                     | 0,1  | 0,6  |
| 3  | Potenciómetros lineales 10KΩ      | 0,6  | 1,8  |
| 3  | Resistencias 470Ω                 | 0,04 | 0,12 |
| 2  | Leds                              | 0,25 | 0,5  |
| 1  | Regulador 7805                    | 0,75 | 0,75 |
| 6  | Resistencias 4,7kΩ                | 0,04 | 0,24 |
| 3  | Resistencias 1,2kΩ                | 0,04 | 0,12 |
| 9  | Diodos Zener 1N4732A              | 0,25 | 2,25 |
| 4  | Resistencias 100Ω                 | 0,04 | 0,16 |
| 4  | Resistencias 1KΩ                  | 0,04 | 0,16 |
| 4  | Resistencias 5,6KΩ                | 0,04 | 0,16 |
| 1  | Cristal 4Mhz                      | 1,25 | 1,25 |
| 3  | Resistencias 15kΩ                 | 0,04 | 0,12 |
| 4  | Resistencias 220Ω                 | 0,04 | 0,16 |
| 2  | Capacitores cerámicos 22 pF       | 0,1  | 0,2  |
| 1  | Potenciómetro 10kΩ                | 0,5  | 0,5  |
| 4  | Resistencias 10kΩ                 | 0,04 | 0,16 |
| 4  | Fundas Ácido Sulfúrico            | 0,65 | 2,6  |
| 5  | Brocas                            | 0,6  | 3    |
| 5  | Metros de Estaño                  | 0,6  | 3    |

CONTINÚA





|   |                                 |      |        |
|---|---------------------------------|------|--------|
| 1                                       | Pomada para soldar              | 3    | 3      |
|   | Batería Lipo Zippy 5800mA 11.1V | 40   | 40     |
| 1                                       | Batería Lipo Zippy 5800mA 25.1V | 120  | 120    |
| 6                                       | Impresiones placas              | 0,6  | 3,6    |
| 4                                       | Resistencias 3,3kΩ              | 0,04 | 0,16   |
| <b>Subtotal 1</b>                       |                                 |      | 309,32 |
| <b>Sistema Mecánico</b>                 |                                 |      |        |
| 4                                       | Ruedas Omnidireccionales        | 150  | 600    |
| 1                                       | Rollo de Cadena Tsubaki RS35-2  | 52   | 52     |
| 4                                       | Candados para cadena RS35-2     | 3,5  | 14     |
| 4                                       | Catarinas R35-2, 11dte          | 9    | 36     |
| 4                                       | Catarinas R35-2, 22dte          | 12   | 48     |
| 6                                       | Ejes Aluminio Aleado ∅ 20mm     | 8    | 48     |
| 4                                       | Ejes Aluminio Aleado ∅ 48mm     | 16   | 64     |
| 2                                       | Perfiles Aluminio Estructural   | 15   | 30     |
| 1                                       | Rollo de bisagra tipo acordeón  | 7    | 7      |
| 120                                     | Pernos M3 ∅1/2in                | 0,15 | 18     |
| 8                                       | Rodamientos                     | 1    | 8      |
| 1                                       | Eje Duralón ∅35mm               | 7    | 7      |
| 4                                       | Chumaceras de piso ∅1in         | 10   | 40     |
| 8                                       | Chumaceras de pared ∅1in        | 10   | 80     |
| 30                                      | Arandelas varias                | 0,05 | 1,5    |
| 60                                      | Tornillos varios                | 0,1  | 6      |
| 30                                      | Tuercas de presión              | 0,05 | 1,5    |
| <b>Subtotal 2</b>                       |                                 |      | 1061   |
| <b>Herramientas y materiales varios</b> |                                 |      | 90     |

CONTINÚA



|   |         |
|---|---------|
| <b>Diseño e implementación plataforma</b>                         | 110     |
| <b>Diseño e implementación Placas control, baterías y motores</b> | 130     |
| <b>TOTAL</b>  | 1700,32 |

En la tabla 19 se especifica el valor total gastado durante el desarrollo del presente trabajo en lo que se refiere al diseño, construcción e implementación de la plataforma robótica omnidireccional.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- El sistema de transmisión del movimiento por cadenas cumplió con los requerimientos especificados en el capítulo II, no presentó inconvenientes durante la puesta en marcha de la plataforma, además, para la velocidad máxima a la cual se desplaza la plataforma no produce ruido considerable por lo que se considera una elección adecuada.
- Fue posible verificar de manera correcta los movimientos típicos de un sistema de tracción omnidireccional como son: desplazamiento vertical, lateral, diagonal en grados y rotación angular para 5 diferentes pisos de prueba, corroborando en cada uno de ellos un buen funcionamiento de la plataforma. Sin embargo, los mejores resultados se evidenciaron en el piso de goma dada una mejor adherencia de las ruedas minimizando el corrimiento, inconveniente ocasionado debido al material con el que están fabricados los rodillos (nylon).
- El control de la plataforma omnidireccional se realizó mediante un HMI desarrollado en Visual Studio, el cual permitió un manejo adecuado mediante distintos parámetros de ingreso como: módulo de velocidad, componentes de velocidad, velocidad angular y ángulos de desplazamiento, facilitando así la maniobrabilidad para la plataforma móvil y proporcionando una mejor visualización al operario del estado actual de la plataforma. Se comprobó que el tiempo de ejecución para trayectorias complejas fue considerablemente menor al de un sistema de tracción típico y la autonomía de las baterías en trabajo continuo fue de 8 horas.

- De acuerdo con las pruebas realizadas, la maniobrabilidad de la plataforma se comprobó correctamente en cada piso de prueba y los movimientos se ejecutaron de acuerdo a la orden asignada por el operario en tiempo real. Se superó una pista de obstáculos dispuestos de tal manera que se pudo identificar con mayor interés el desplazamiento diagonal a distintos grados minimizando el tiempo de operación y visualizando de mejor manera la capacidad de manejo de la plataforma omnidireccional. Se observó que existe una mejor maniobrabilidad a bajas velocidades debido al tiempo de reacción del usuario para realizar el cambio de direcciones.

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

- Para un mejor desempeño de la plataforma móvil omnidireccional respecto al corrimiento que se presenta en las ruedas sobre el piso, se puede realizar un cambio de llantas las cuales incorporen tapas fabricadas en acero lo que asegura una mayor resistencia y sus rodillos estén hechos de un material que presente mejor adherencia al piso como por ejemplo, rodillos de poliuretano o caucho.
- Las placas de potencia y de control pueden ser rediseñadas para optimizar el espacio, siendo posible incorporar nuevos elementos o facilitar el acceso a los componentes que integran la plataforma móvil.
- Se puede considerar un material más resistente para la fabricación de la estructura base, de tal modo, que sea capaz de soportar una mayor carga y, por lo tanto, su deformación sea menor.
- Para futuras aplicaciones se recomienda incorporar un algoritmo de control que permita la navegación autónoma de la plataforma, permitiendo que se desplazase de forma automática hacia un punto específico a través de una trayectoria predefinida, siendo capaz de evadir obstáculos sin la necesidad que el operario intervenga en el manejo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Catedu. (2013). *e-educativa*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2015, de e-educativa: [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/5\\_transmision\\_por\\_engranajes.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/5_transmision_por_engranajes.html)
- Doroftei, I., Grosu, V., & Spinu, V. (01 de Septiembre de 2007). *INTECH OPEN*. Recuperado el 10 de Marzo de 2016, de [http://www.intechopen.com/books/howtoreference/bioinspiration\\_and\\_robotics\\_walking\\_and\\_climbing\\_robots/omnidirectional\\_mobile\\_robot\\_-\\_design\\_and\\_implementation](http://www.intechopen.com/books/howtoreference/bioinspiration_and_robotics_walking_and_climbing_robots/omnidirectional_mobile_robot_-_design_and_implementation)
- Drakos, N. (2011). *Mi coche online*. Recuperado el 21 de Marzo de 2016, de <http://www.tamps.cinvestav.mx/~mgomez/Odometria/node4.html>
- electric Briks. (2010). *electric Briks*. Recuperado el 08 de Enero de 2016, de <http://blog.electricbricks.com/2010/07/sistemas-holonomicos/>
- Englobal. (2013). *EnGlobal Technology Co*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2016, de <http://www.eglobaltech.cn/>
- Grupo Carman. (2015). *Grupo Carman*. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de <http://grupocarman.com/blog/traccion-omnidireccional/>
- HobbyKing. (2009). *HobbyKing*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2016, de [https://hobbyking.com/en\\_us/zippy-compac](https://hobbyking.com/en_us/zippy-compac)
- Imbaquingo, L., & Salavarría, R. (2013). *Robot omnidireccional controlado con NIOS II*. Recuperado el 20 de febrero de 2016, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/25356/1/Resumen%20de%20Tesis%20RSalavarría%20y%20LImbaquingo,%20director%20de%20tesis%20Msig.%20Ronald%20Ponguillo%2015%20octubre%202013.pdf> . Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil.
- Lalama, L. (2014). *Implementación de un robot móvil terrestre omnidireccional semiautónomo y telecontrolado a través de un teléfono inteligente android*. (Tesis de Grado). Universidad de Guayaquil. Guayaquil.

- León, J. (2013). *BlogSpot*. Recuperado el 28 de Marzo de 2016, de <http://sistemasdeunrobot.blogspot.com/>
- Lupion, F. (2012). *El blog del profesor de tecnología*. Recuperado el 03 de Abril de 2016, de <http://elblogdelprofesordetecnologia.blogspot.com/2009/05/sistema-de-poleas-con-correa.html>
- Martínez, A. (2012). *Plataforma móvil omnidireccional a partir de dos robots móviles diferenciales*. Recuperado el 28 de Abril de 2016, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3541/Tesis.pdf?sequence=1> México, D.F.: Universidad Autónoma de Mexico.
- Matínez, S., & Sisto, R. (2010). *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*. (Proyecto de Grado). Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en Montevideo. Uruguay. Recuperado el 12 de Diciembre de 2015, de <http://www.fing.edu.uy/inco/grupos/mina/pGrado/easyrobots/doc/Final.pdf>
- Méndez, S. (2007). *Automatización y Robótica Industrial*. Recuperado el 25 de Junio de 2016, de [http://www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iaei/LOC\\_MOV.pdf](http://www.esi2.us.es/~vivas/ayr2iaei/LOC_MOV.pdf)
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquina*. México: Pearson Education.
- NASA/JPL/Cornell University. (2003). *Photo Journal NASA*. Recuperado el 05 de Febrero de 2016, de <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA04413>
- Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- PCE-iberica. (2015). Recuperado el 28 de Marzo de 2016, de <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/sistemas/sensores-temperatura.htm>

- Reyes, F. (2011). *Robótica Control de Robots manipuladores*. México: AlfaOmega.
- Sánchez, A., & Suárez, A. (19 de Agosto de 2015). Plataforma móvi omnidireccional de cuatro llantas suecas (MECANUM) en configuración AB. *Tesis\_Perfect\_robot4ruedas omni*. México, D.F. Recuperado el 01 de Octubre de 2016
- Santiago Martínez, R. (22 de 11 de 2009). Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales. Montevideo, Uruguay. Recuperado el 02 de Septiembre de 2016, de <http://www.fing.edu.uy/inco/grupos/mina/pGrado/easyrobots/doc/SOA.pdf>
- Shigley, J., & Mischke, C. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (Novena ed.). México, D.F.: McGraw-Hill.
- SIRSEIR. (2012). *Taringa*. Recuperado el 28 de Febrero de 2016, de <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/15475393/El-robot-Phantom-X-agilidad-asombrosa-en-seis-patas.html>
- TrossenRobotics. (2009). *TrossenRobotics*. Recuperado el 16 de Julio de 2016, de <http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-pro-h54-200-s500-r-robot-actuator>

# ANEXOS





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

## CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue realizado por las señoritas **JOHANNA ESTEFANÍA IZA** y **LAURA GABRIELA TACO POZO**.

En la ciudad de Latacunga, a los 25 días del mes de Enero del 2017.

**Aprobado por,**

Ing. Oscar Arteaga  
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo  
DIRECTOR DEL CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca  
SECRETARIO ACADÉMICO