

# Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE

## Extensión Latacunga



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

## Ingeniería en Mecatrónica

**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**

TUTOR:

- ING. OSCAR ARTEAGA

AUTORAS:

- JOHANNA IZA
- GABRIELA TACO

# Objetivos

## ▶ Objetivo General

- ▶ Investigar la maniobrabilidad de una plataforma robótica con sistema de tracción omnidireccional para su 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.

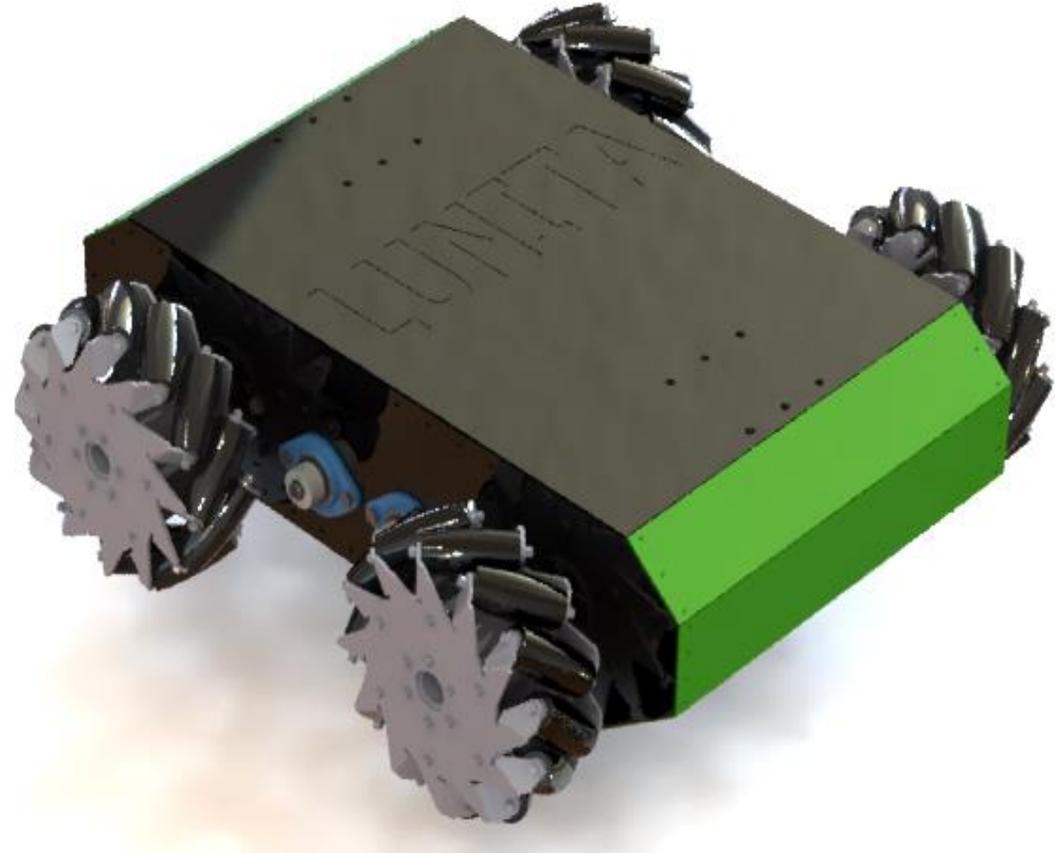
## ▶ Objetivos Específicos

- ▶ Diseñar e implementar el sistema de tracción omnidireccional para la plataforma robótica, mediante el uso de ruedas omnidireccionales.
- ▶ Implementar los sistemas de potencia y de control.
- ▶ Calibrar, ajustar y realizar pruebas del sistema de movimiento omnidireccional.
- ▶ Comprobar la maniobrabilidad de la plataforma omnidireccional.

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN OMNIDIRECCIONAL

## ▶ Parámetros de diseño

- ▶ Velocidad requerida = 0.60 m/s
- ▶  $m_{diseño}$ : masa de diseño = 100 kg
- ▶  $W_{diseño}$ : peso de diseño = 981 N
- ▶  $W_p$ : peso plataforma = 32 kg



# Cargas de Diseño

- ▶ **Factor de carga**

- ▶ Porcentaje de imprevistos el 10%.

- ▶ **Comprobación para el peso de diseño**

- ▶  $W_C = W_b + W_{gr} + W_l + W_{sf} \longrightarrow W_C = 12kg$

- ▶  $W_{TOTAL} = W_p + W_C \longrightarrow W_{TOTAL} = 44kg$

- ▶  $W_d = W_T + W_C * f_{carga} \longrightarrow W_d = 442N$

- ▶ **Fuerza de rozamiento estática y dinámica**

- ▶  $F_{rs} = \mu_s * W_{diseño} = 981 N$

- ▶  $F_{rk} = \mu_k * W_{diseño} = 784.80 N$

# Cargas de Diseño

## ▶ Torque total

$$\text{▶ } T = F_{rk} * \frac{\phi_{llanta}}{2} \longrightarrow T = 79,75 \text{ Nm}$$

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

## ▶ Potencia requerida

$$\text{▶ } P = T_{rueda} * \omega_{requerida}$$

$$\text{▶ } \omega_{requerida} = 5.91 \text{ rad/s}$$

$$\text{▶ } P = 117.81 \text{ W} = 0.16 \text{ HP}$$

## ▶ Cálculo del diámetro de la llanta

$$\text{▶ } \phi_{req} = \frac{2 * \vec{V}_{requerida}}{\omega_{motor}} \longrightarrow \phi_{req} = \frac{2 * 0.60 \text{ m/s}}{2.92 \text{ rad/s}} = 0.41 \text{ m}$$

# Diseño del sistema de transmisión

## ▶ Potencia transmitida

$$\text{▶ } P_{transmitida} = T_{motor} * \omega_{motor} \longrightarrow P_{transmitida} = (44.2 \text{ N} * \text{m}) \left( 2.92 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = 130 \text{ W}$$

## ▶ Potencia de diseño

$$\text{▶ } P_d = P_{transmitida} * FS \longrightarrow P_d = 0.174 \text{ hp} * 1 = 0.174 \text{ hp}$$

## ▶ Relación de transmisión

$$\text{▶ } i = \frac{\phi_{req}}{\phi_{llanta}} \longrightarrow i = \frac{0.41 \text{ m}}{0.2032 \text{ m}} = 2.02 \approx 2$$

## ▶ 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.

$$\text{Para cadena RS35-2 a 50 rpm} \longrightarrow P_d = 0.16 \text{ hp} * 1.7 = 0.272 \text{ hp}$$

# Diseño del sistema de transmisión

- ▶ **Cálculo del número de dientes de la catarina**
  - ▶  $i = \frac{Z_2}{Z_1} \longrightarrow Z_2 = i * Z_1 = 22$  dientes
- ▶ **Para cadena RS35-2,  $p = 3/8$  in se tienen los siguientes valores**
  - ▶  $Z_1 = 11$  *dientes*
  - ▶  $\varnothing_{p1} = 1.331$  in = 33.81 mm
  - ▶  $\varnothing_{ext1} = 1.502$  in = 38.15 mm
  - ▶  $Z_2 = 11$  *dientes*
  - ▶  $\varnothing_{p2} = 2.635$  in = 66.93 mm
  - ▶  $\varnothing_{ext2} = 2.833$  in = 71.96 mm

# Velocidad angular de la Plataforma

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

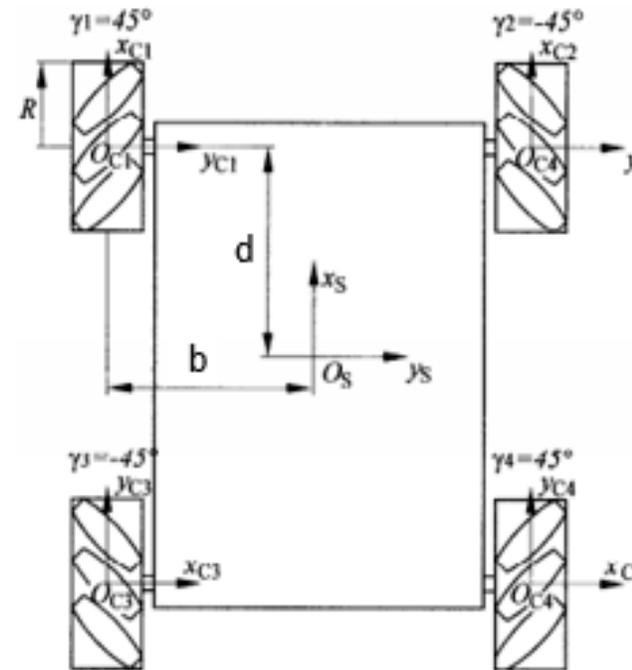
$$\blacktriangleright R = 0.1016m$$

$$\blacktriangleright b = 0.255m$$

$$\blacktriangleright d = 0.17m$$

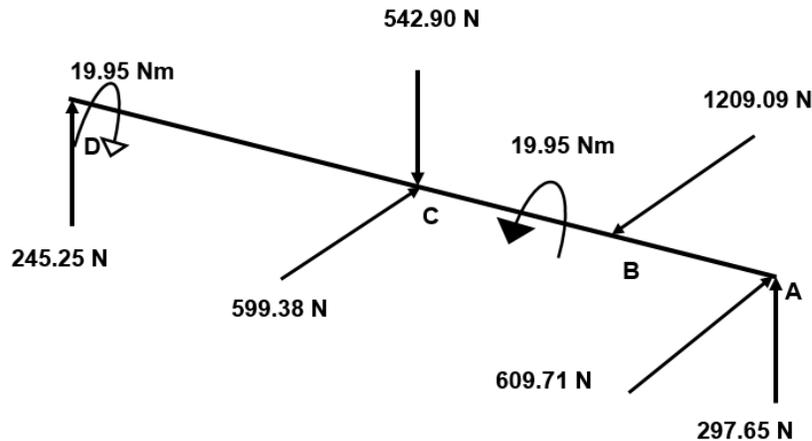
$$\blacktriangleright \omega_{\max \text{rueda}} = 5.84 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

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



# Diseño del eje de la rueda

- ▶ Material: Aluminio 2024-T4
- ▶  $S_y = 324 \text{ MPa}$
- ▶  $S_u = 469 \text{ MPa}$
- ▶  $F_s = 2.5$



$$M_B = \sqrt{M_{Bmax}^2 + M_{Bmin}^2}$$

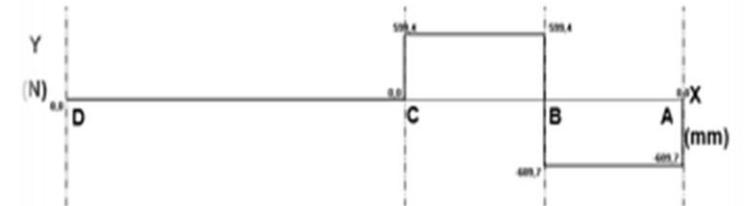
$$M_B = 19.69 \text{ Nm}$$

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

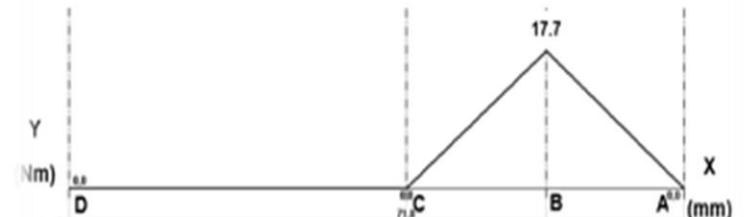
$$D_B = 0.0127 \text{ m} = 12.70 \text{ mm}$$



f. Diagrama de fuerza cortante

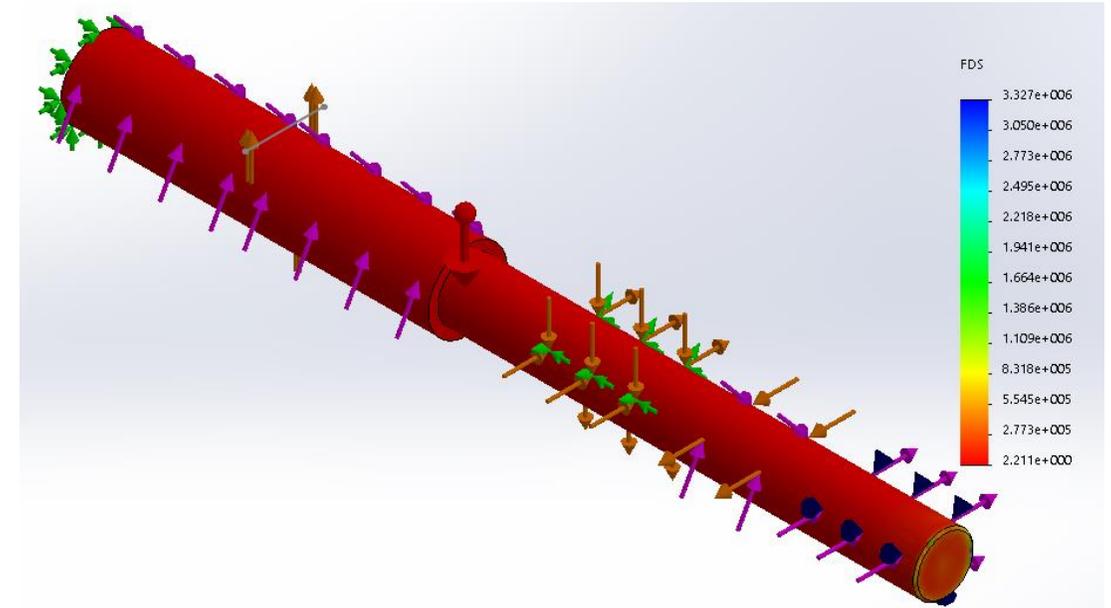
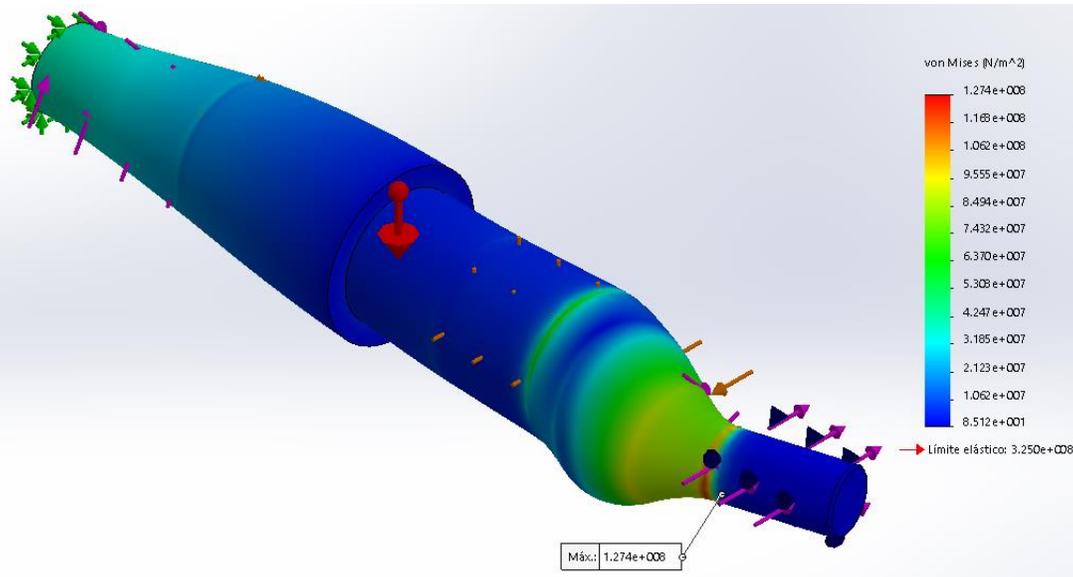


g. Diagrama de momento flexionante



| Nombre             | Tipo                      | Mín.                                       | Máx.   |
|--------------------|---------------------------|--|--|
| <b>Tensiones 1</b> | VON: Tensión de von Mises | 85.1249<br>N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 52687 | 1.27403e+008 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 39017 |

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



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

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

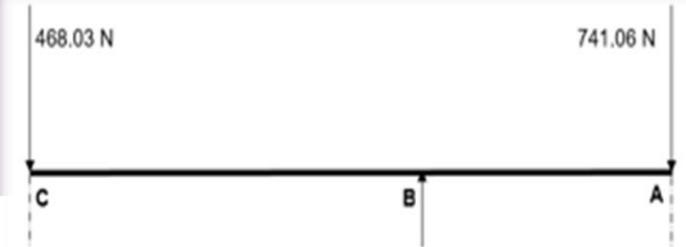
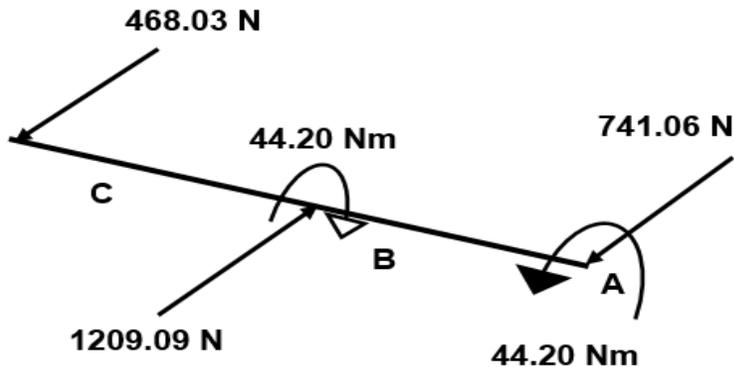
# Diseño del eje del motor

- ▶ Aluminio 7075-T6
- ▶  $S_y = 503 \text{ MPa}$
- ▶  $S_u = 572 \text{ MPa}$
- ▶  $F_s = 2.5$

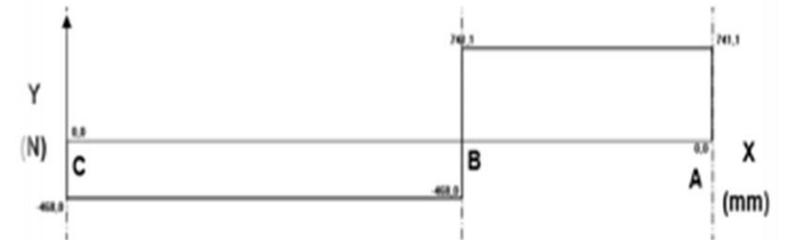
$$M_B = 13.30 \text{ Nm}$$

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

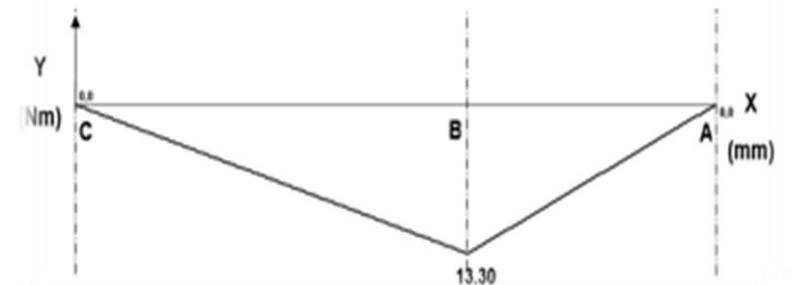
$$D_B = 0.0127 \text{ m} = 12.7 \text{ mm}$$



b. Diagrama de fuerza cortante

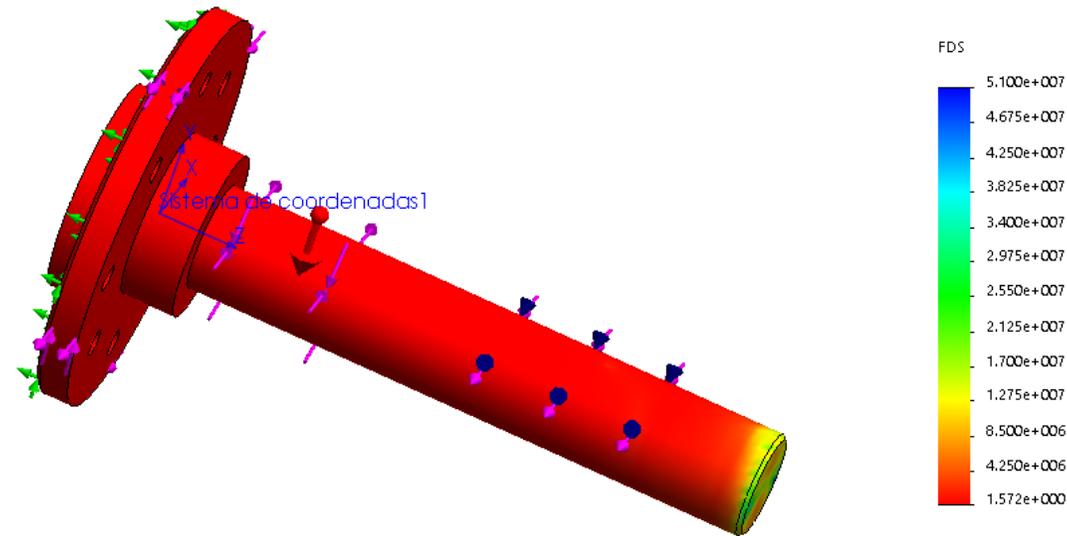
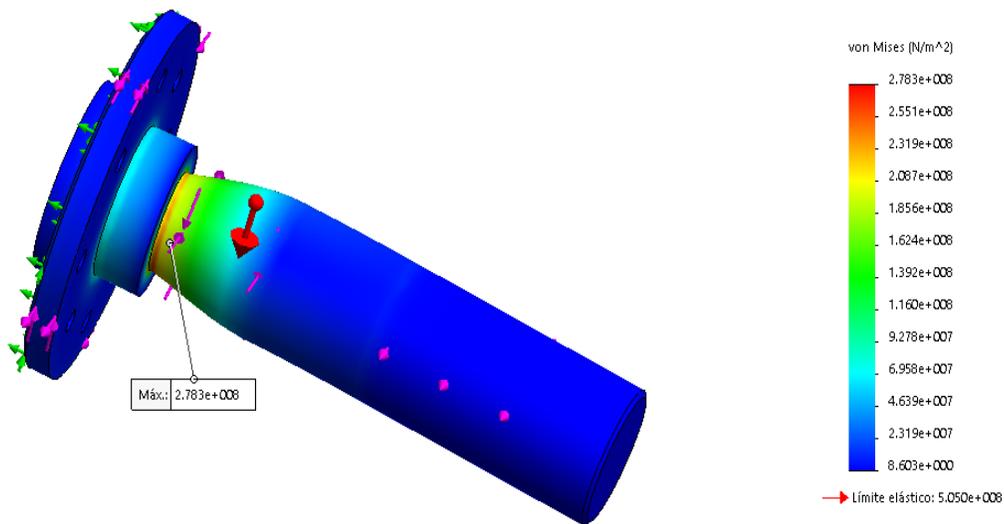


c. Diagrama de momento flexionante



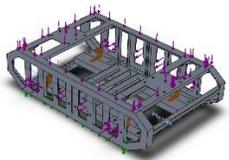
| Nombre                | Tipo                      | Mín.                                   | Máx.   |
|-----------------------|---------------------------|--|--|
| <b>Tensiones</b><br>1 | VON: Tensión de von Mises | 8.6033 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 58158 | 2.78329e+008 N/m <sup>2</sup><br>Nodo: 51210 |

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



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

**Factor de seguridad mínimo en el eje del motor**

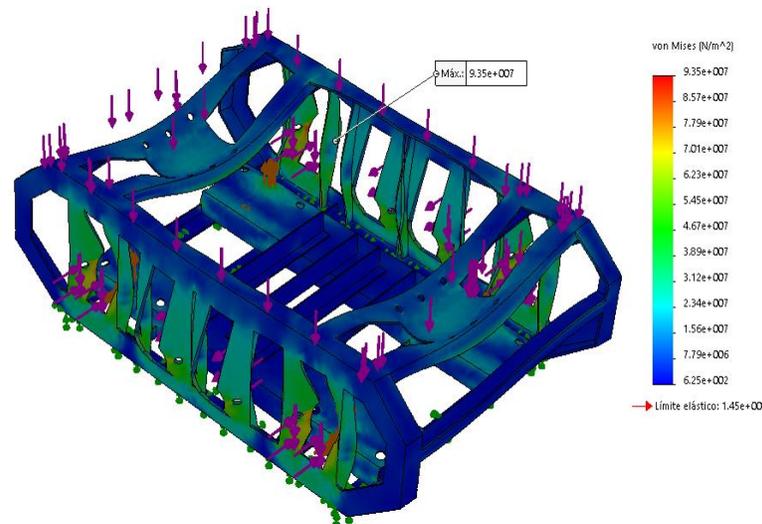


# estructura base

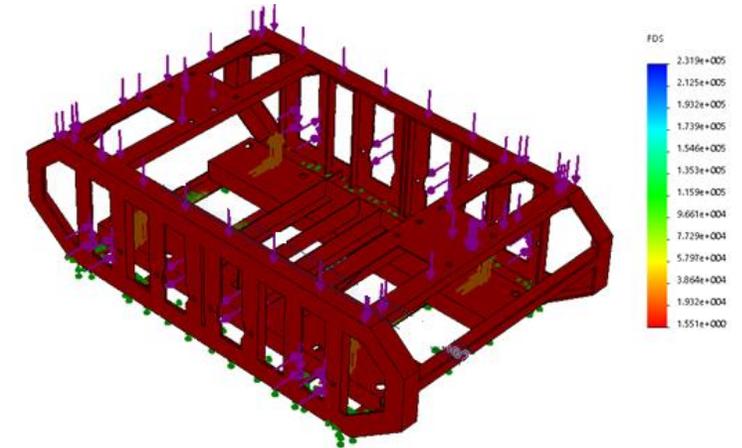
| Referencia de modelo       |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| Propiedades                |                            |
| <b>Material:</b>           | Aluminio 6063-T5           |
| <b>Criterio de error:</b>  | Tensión de von Mises       |
|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

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

| Nombre                       | Tipo                      | Mín.                      | Máx.                     |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>Factor de seguridad 1</b> | Tensión de von Mises máx. | 1.55137<br>Nodo:<br>32189 | 231860<br>Nodo:<br>22361 |



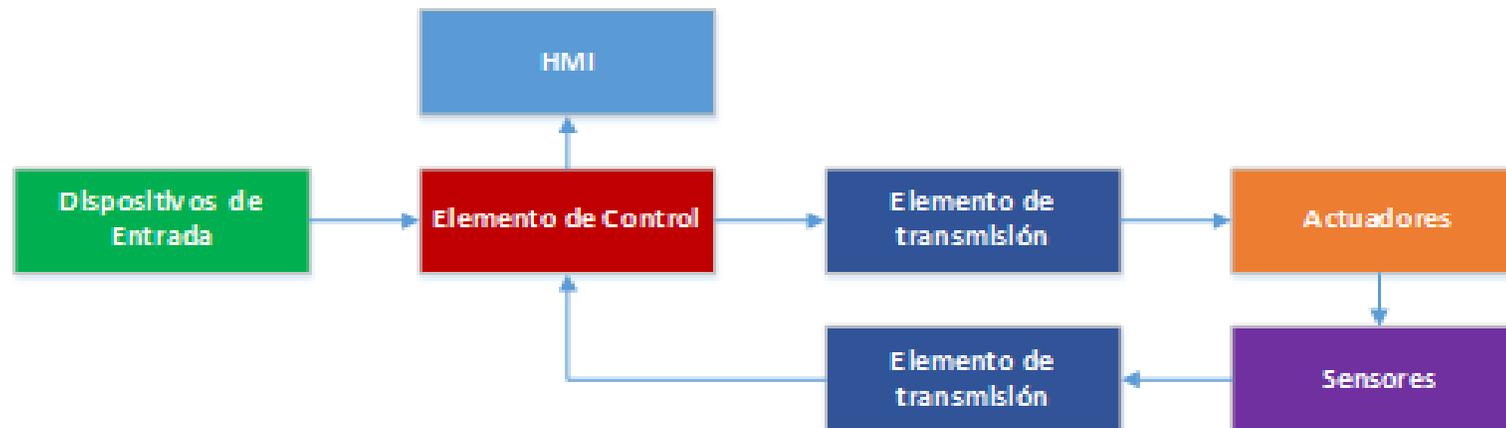
**Esfuerzos resultantes de tensiones (Von Mises) en la estructura base**



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

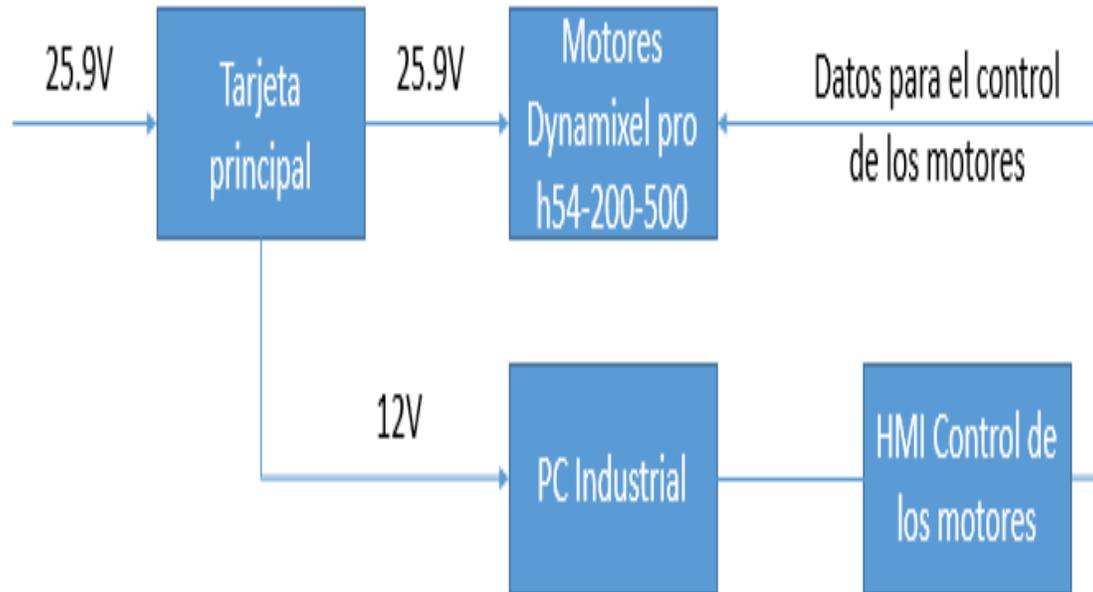
# Selección de componentes eléctricos y de control

- ▶ **Actuador:** Dynamixel Pro h54-200-500
- ▶ **Sensores:** Tacómetro, encoder, sensor de temperatura
- ▶ **Elementos de Control:** EGLOBAL Fanless mini Pc i7
- ▶ **Elementos de transmisión:** USB2Dynamixel Adapter
- ▶ **Dispositivos de Entrada:** Baterías ➔ ZIPPY Compact 5800mAh 7S



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

## Sistema de potencia



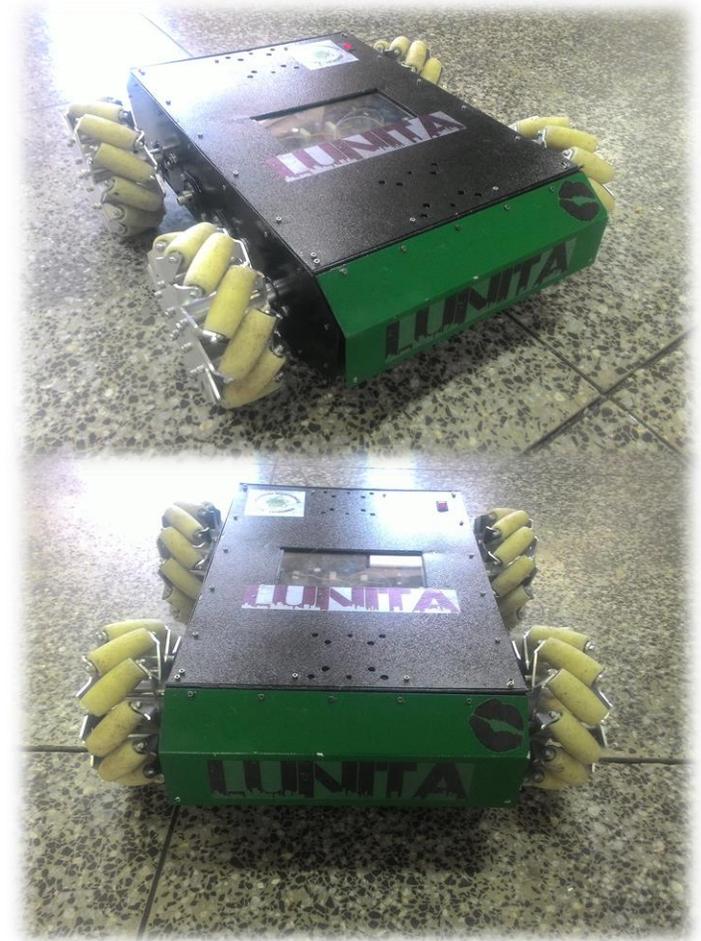
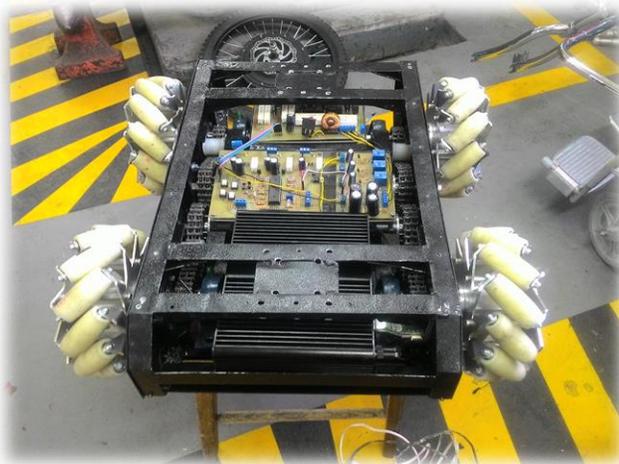
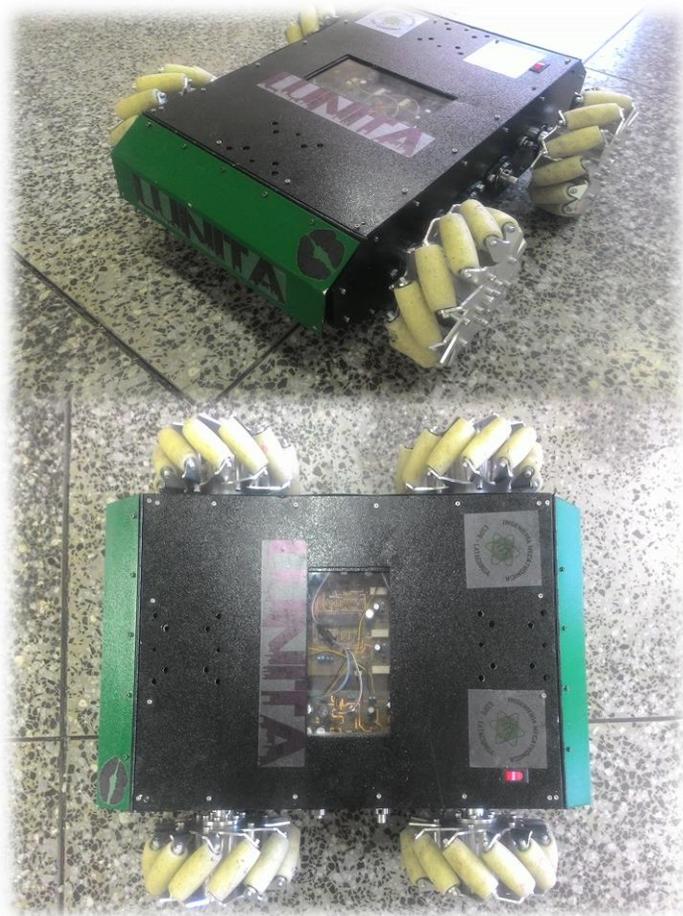
## Sistema de control

The screenshot shows the 'FormControl' software interface. It features several control panels and data displays:

- Movimientos Estándar:** Includes buttons for 'Adelante', 'Izquierda', 'STOP', 'Derecha', and 'Atras'.
- Movimientos Especiales:** Includes buttons for 'SCR', 'Mod\_Vel', 'SMR', and 'Componentes'.
- Velocidad and Ángulo:** Displays 'Ángulo' (000.0 Grad), 'Velocidad' (000.0 m/s), 'Vx' (000.0 m/s), 'Vy' (000.0 m/s), and 'Vel. Ang.' (000.0 rad/s).
- Datos De Los Motores:** A table showing motor velocities and Hz values.
- Estado:** Shows the status of four motors, all currently 'Inhabilitado'.
- Comunicación:** Includes fields for 'Puerto COM' (7) and 'BPM Rate' (2000000), along with a 'Conectar' button.
- Línea De Comandos:** A text input field for command entry.

|                     | rad/s | Hz_Motor |
|---------------------|-------|----------|
| Velocidad Motor 1 = | 00.00 | 00.00    |
| Velocidad Motor 1 = | 00.00 | 00.00    |
| Velocidad Motor 1 = | 00.00 | 00.00    |
| Velocidad Motor 1 = | 00.00 | 00.00    |

# Construcción e implementación del sistema de potencia y de control



# PRUEBAS Y RESULTADOS

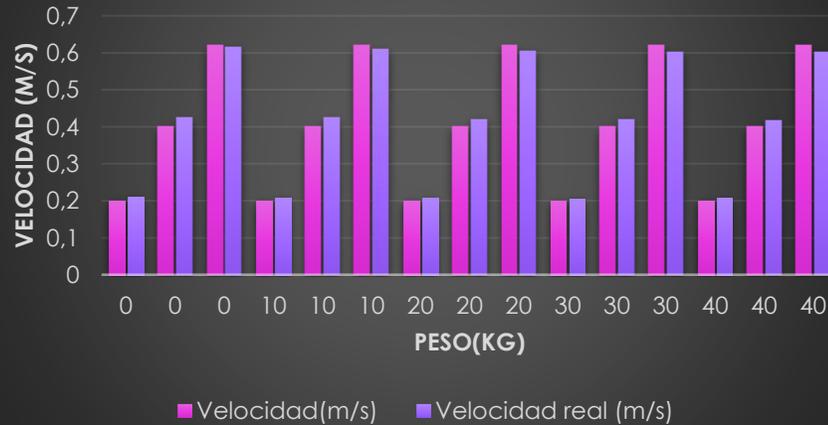
## ► Pruebas de funcionamiento

- Se realizaron pruebas en tres tipos de pisos, concreto pulido, cemento y mármol

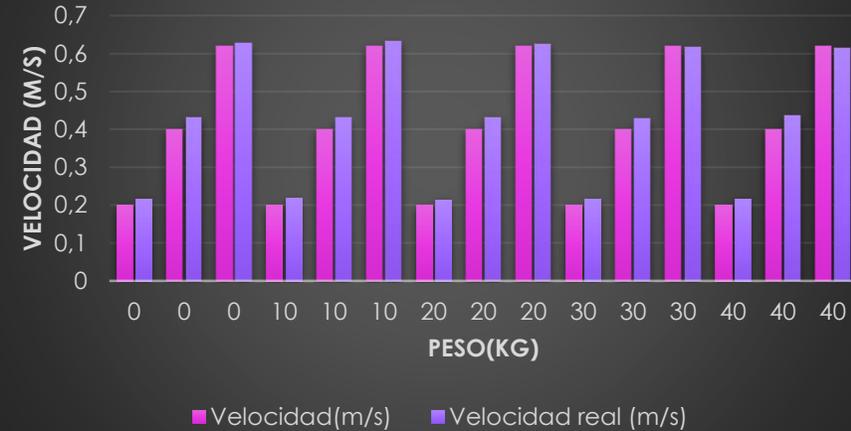
| ERROR PORCENTUAL |                 |      |      |            |      |      |          |       |      |
|------------------|-----------------|------|------|------------|------|------|----------|-------|------|
| Piso             | Concreto Pulido |      |      | Mármol     |      |      | Concreto |       |      |
| Carga (kg)       | VERTICAL        |      |      | HORIZONTAL |      |      | 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 |

# Velocidad asignada vs Velocidad real en movimiento vertical

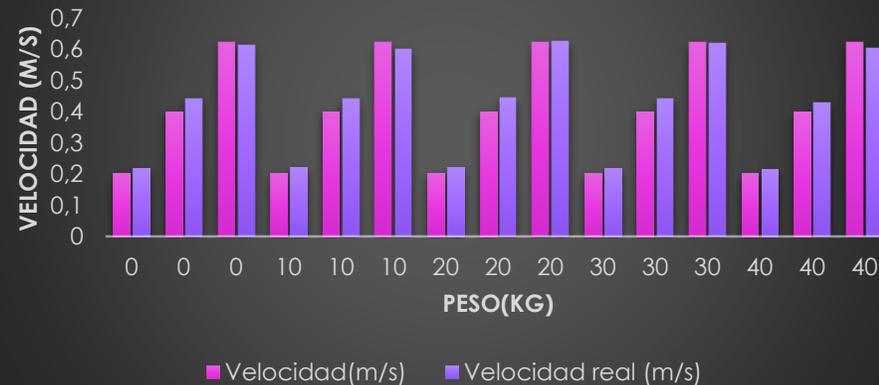
## Movimiento Vertical Piso: Concreto



## Movimiento Vertical Piso: Mármol



## Movimiento Vertical Piso: Concreto pulido



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

# Pruebas de maniobrabilidad

| MANIOBRABILIDAD EN PISTA DE OBSTÁCULOS |                         |                  |                             |                         |  |
|--|-------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|--|
| Velocidad (m/s)                        | Distancia recorrida (m) | Nº de obstáculos | Distancia de separación (m) | Tiempo de ejecución (s) | Movimientos combinados                   |
| 0.30                                   | 14                      | 14               | 1                           | 85                      | Vertical, lateral, diagonal y rotacional |
| 0.62                                   | 14                      | 14               | 1                           | 48                      | Vertical, lateral, diagonal y rotacional |

# Pruebas de trayectoria

| DESVIACIÓN DE TRAYECTORIA (mm) |                 |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |
|--------------------------------|-----------------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
| Carga (kg)                     |                 | 0 kg     |         |          | 10 kg    |         |          | 20 kg    |         |          | 30 kg    |         |          | 40 kg    |         |          |
| Piso                           | Velocidad (m/s) |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |          |         |          |
| Concreto pulido                | Movimiento      | Vertical | Lateral | Diagonal |
|                                |                 | 0.2      | 5       | 2        | 4        | 0       | 11       | 10       | 13      | 9        | 5        | 6       | 3        | 5        | 5       | 6        |
|                                | 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                         | 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                       | 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       |

# Análisis Económico del proyecto

| No. | DETALLE  | VALOR TOTAL    |
|-----|--|----------------|
| 1   | <b>Sistema eléctrico y de control</b><br>(resistencias, borneras, baquelas, potenciómetros, reguladores, leds, capacitadores, Baterías Lipo, zócalos)                                | 309,32         |
| 2   | <b>Sistema Mecánico</b> (Juego de llantas omnidireccionales, chumaceras de pared y piso, perfiles de aluminio, catarinas de 11 y 22 dientes, ejes de aluminio aleado, cadena RS35-2) | 1061           |
| 3   | <b>Herramientas y materiales varios</b>  | 90             |
| 4   | <b>Diseño e implementación plataforma</b>  | 110            |
| 5   | <b>Diseño e implementación Placas control, baterías y motores</b>  | 130            |
|     | <b>TOTAL</b>   | <b>1700,32</b> |

# 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).

# CONCLUSIONES

- ▶ 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.

# 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.



GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN