



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

“El éxito consiste en 1% de inteligencia y el 99% de constancia”





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

INVESTIGACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE LOS ROBOTS OMNIDIRECCIONALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ROBOT RUEDA ESFÉRICA PARA MEJORA DE LA MOVILIDAD EN ESPACIOS REDUCIDOS.

Autores: Adrian Alay
Francisco Moreno

Directora: Ing. Oscar Arteaga



OBJETIVO GENERAL

- Investigar la locomoción de los robots omnidireccionales para el diseño y construcción del prototipo robot rueda esférica para tareas de desplazamiento.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y analizar los parámetros de diseño de locomoción de los robots omnidireccionales a través de la recopilación de información de fuentes científicas aplicado a robots móviles.
- Diseñar y simular un prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional mediante el uso de CAD y CAE.
- Construir el prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional.
- Evaluar experimentalmente la estructura del prototipo con el control de estabilidad propuesto sobre un robot rueda esférica tipo omnidireccional en diversos ambientes de trabajo.



HIPÓTESIS

¿La implementación del prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional permitirá una mejora de la movilidad en espacios reducidos?



FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

ROBOTS MÓVILES

- Creados desde los años treinta para desarrollar funciones inteligentes tales como descubrir caminos en laberintos.
- Simplicidad estructural y mayor eficiencia al momento de movilizarse en terrenos duros y libres de obstáculos.
- Las velocidades de estos van acorde a la aplicación y el entorno de desplazamiento del robot.
- El mayor inconveniente de un robot móvil es el desplazamiento en terrenos blandos.

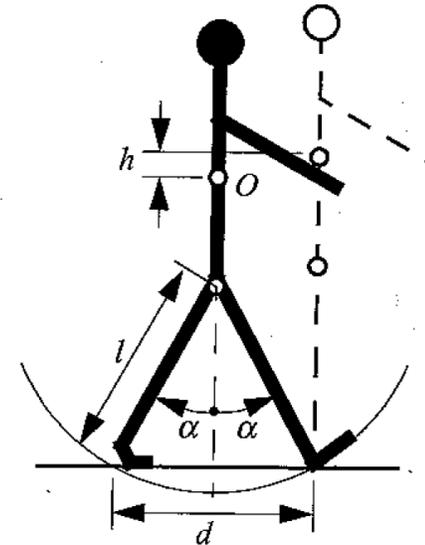


FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN



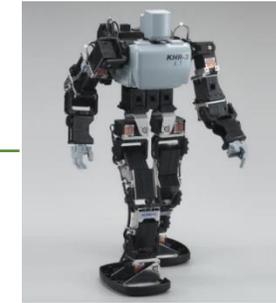
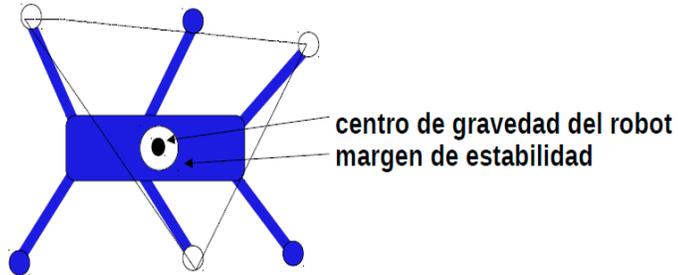
- Mecanismo empleado a un robot que le permite moverse de un lugar a otro en un entorno deseado.
- Todo robot necesita poseer algún método de propulsión ya sean motores o energía.
- Necesitan tener un peso distribuido uniformemente



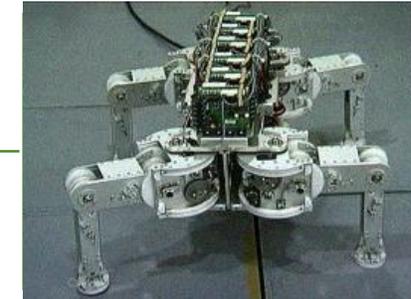
FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

TIPOS DE LOCOMOCIÓN

Mediante
patas



KHR3HV



TITAN VIII

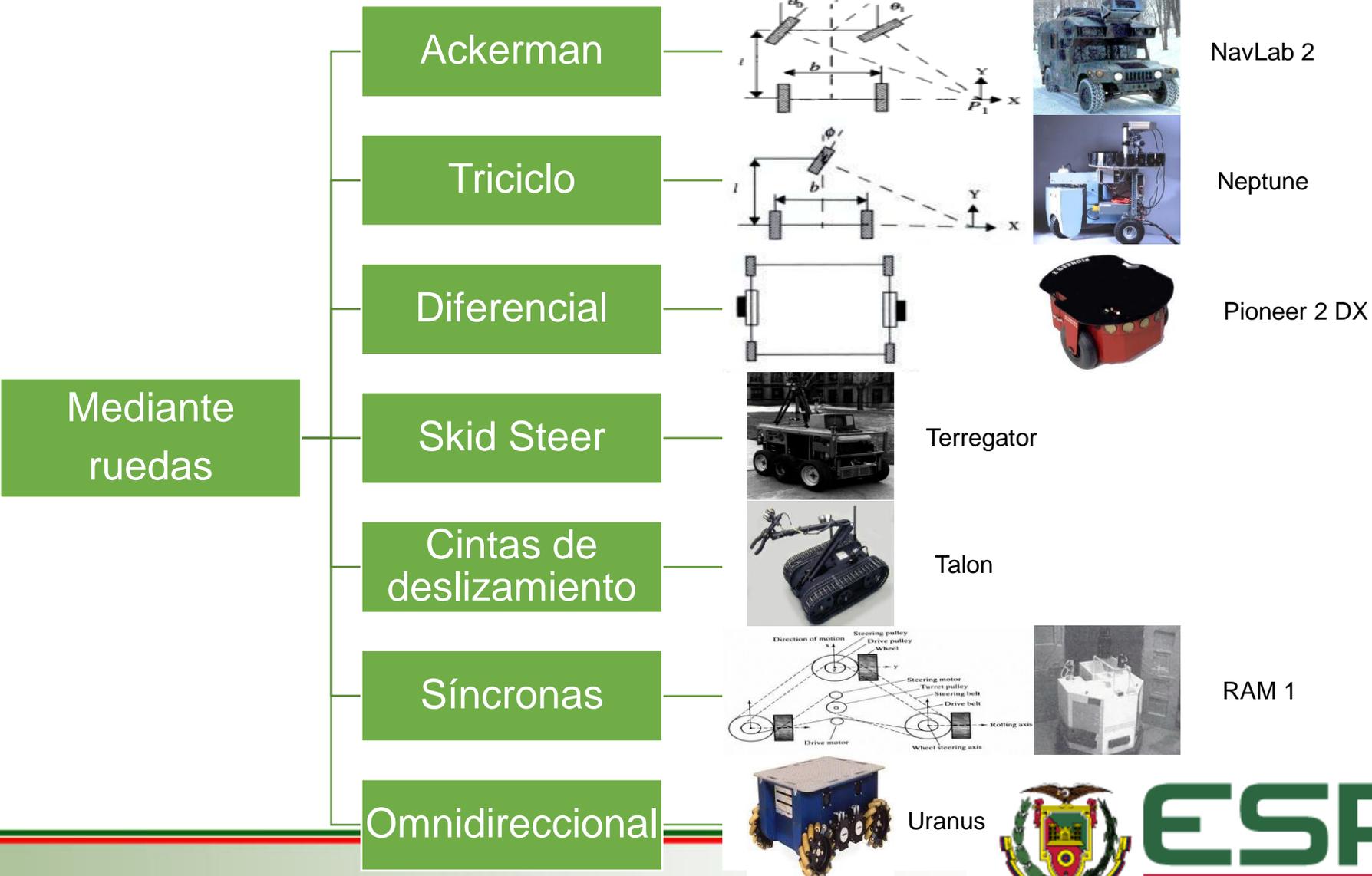


Erle-Spider



FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

TIPOS DE LOCOMOCIÓN



FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN PARA ROBOTS MÓVILES						
TIPO DE LOCOMOCION		VENTAJAS	DESVENTAJAS			
MEDIANTE PATAS		<ul style="list-style-type: none"> • Superan obstáculos con facilidad. • Resistentes al desgaste. • Desplazamiento en la mayoría de terrenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de mecanismo complejo. • Consumo elevado de energía. • Mayor complejidad en el control. • Equilibrio complicado. 			
MEDIANTE RUEDAS	Ackerman	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implementación. • Excelente estabilidad. • Diseño sencillo. • Alcanza altas velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ángulo de giro limitado. • Restricciones holónomas. • Maniobras limitadas. 	Cintas de deslizamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Se adhiere a toda clase de superficies. • Excelente estabilidad. • Mejor movilidad y controlabilidad para desplazamientos. • Sistema de control sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía muy elevado. • Diseño mecánico muy complejo. • Vibraciones muy elevadas. • Imposible realizar trayectorias curvas.
	Triciclo	<ul style="list-style-type: none"> • Tracción en ruedas traseras o delanteras. • No hay deslizamiento. • Uso de una rueda no holonómico. • Diseño fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de gravedad inestable. • Inestabilidad en terrenos irregulares. • Pérdida de tracción en pendientes. 	Síncronas	<ul style="list-style-type: none"> • Posee motores independientes. • Fácil sistema de control. • Desplazamiento lineal preciso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación costosa. • Diseño mecánico complejo. • Difícil implementación.
	Diferencial	<ul style="list-style-type: none"> • Variación de velocidad ajustable y rápida. • Configuración fácil de ruedas. • Económica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisar el control para trayectorias. • Desgaste de neumáticos. • Desplazamiento en áreas sin obstáculos. 	Omnidireccional	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño mecánico sencillo. • Gira en su propio eje vertical. • Movimientos en todas las direcciones. • Sistema holonómico. • Gran estabilidad. • Desplazamiento en la mayoría de superficies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de control muy complejo. • Difícil implementación. • Componentes costosos.
	Skid Steer	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tracción al suelo. • Mayor número de aplicaciones. • Desplazamiento en todos los terrenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño complejo. • Mayor consumo de energía. • Compleja coordinación de velocidades para el desplazamiento. 			



FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

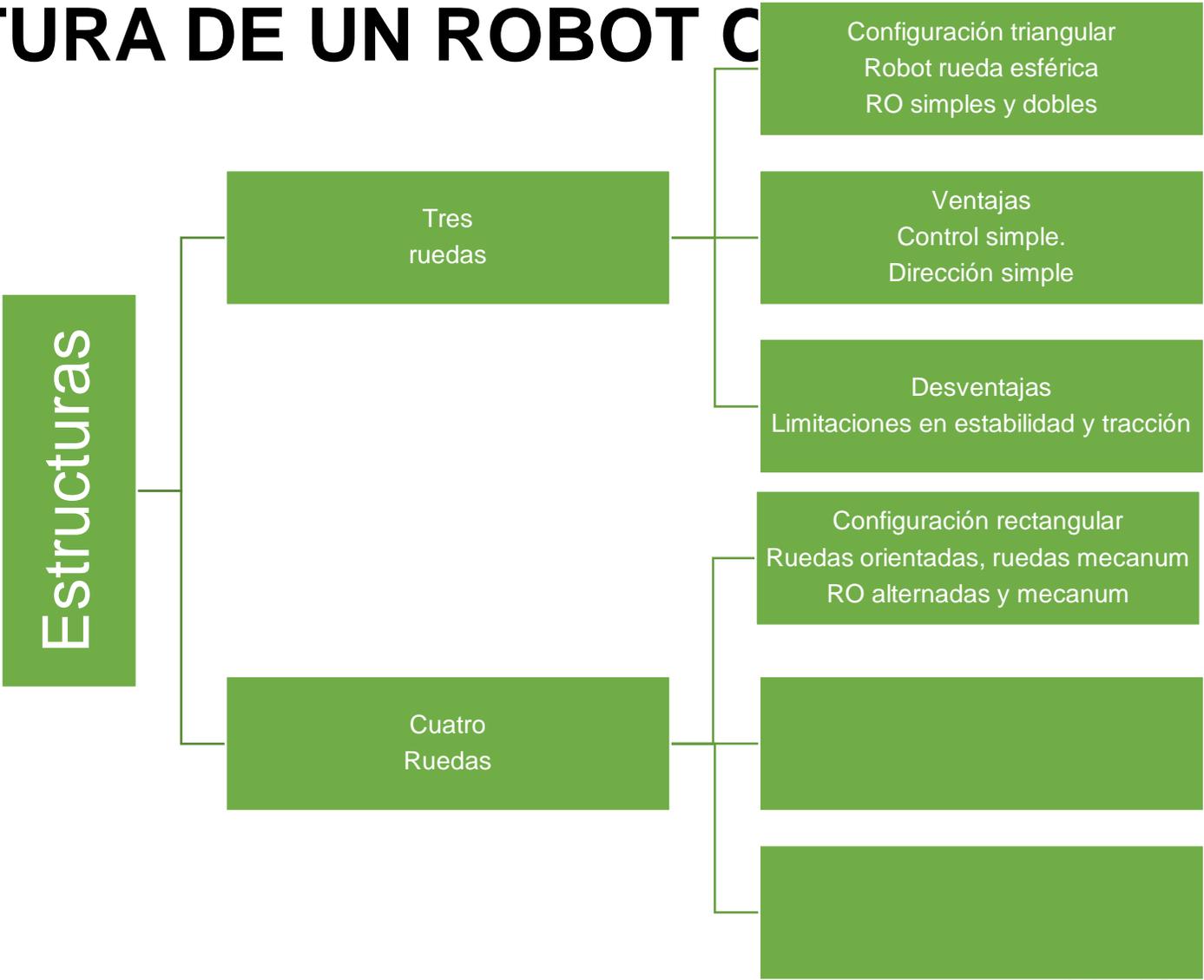
ROBOTS OMNIDIRECCIONALES

- Presentan una de las estructuras más eficientes para realizar movimientos frontales, laterales y rotacionales sobre una superficie plana.
- La disposición de las ruedas brinda al robot tres grados de libertad en el plano xy , movimiento en el eje x , y , orientación ϕ (yaw).
- La característica principal es el tipo de sus ruedas omnidireccionales.

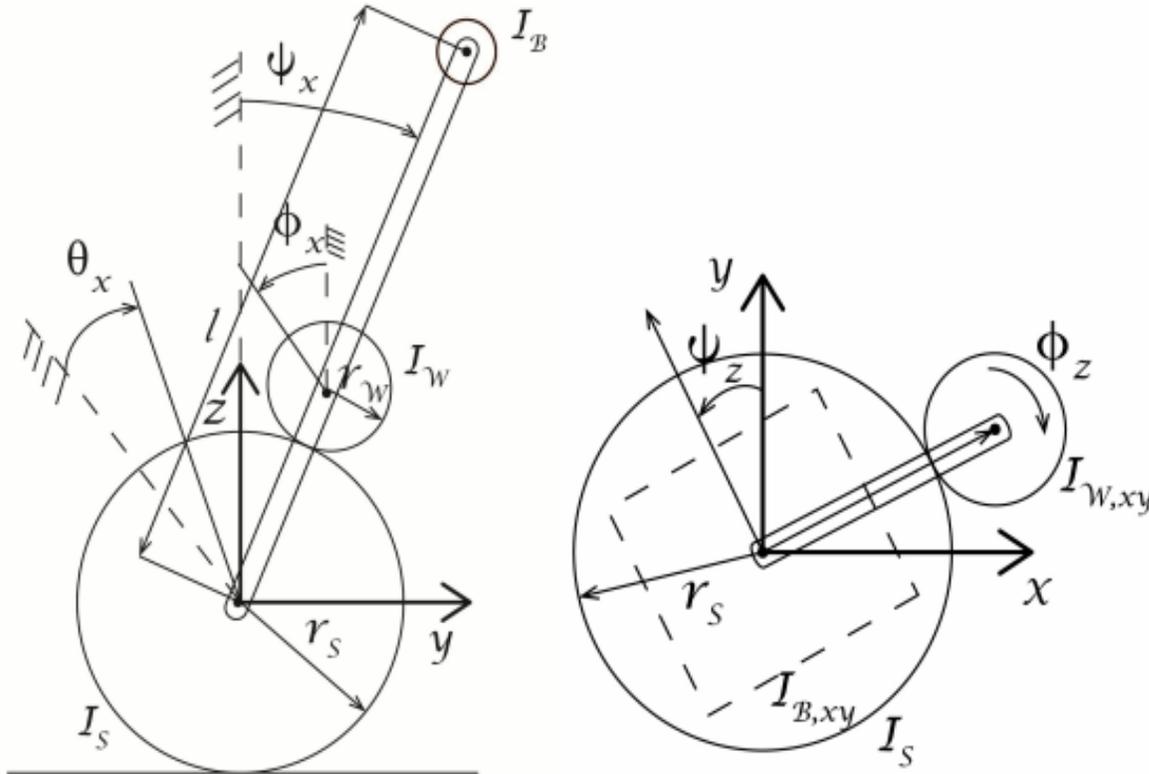


FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

ESTRUCTURA DE UN ROBOT CONWHEELS



ANÁLISIS CINEMÁTICO



Parámetro	Descripción
r_s	Radio de la esfera
r_w	Radio de la rueda
I_s	Momento de inercia de la esfera
I_w	Momento de inercia de la rueda en el plano yz y plano xz
$I_{w,xy}$	Momento de inercia de la rueda en el plano xy.
I_B	Momento de inercia del cuerpo del robot en el plano yz, xz
$I_{B,xy}$	Momento de inercia del cuerpo del robot en el plano xy
l	Distancia entre los centros de masa de la esfera y el cuerpo del robot.
θ_x, θ_y	Orientación de la esfera plano xy
ψ_x, ψ_y, ψ_z	Orientación del cuerpo
ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z	Orientación de la rueda



ANÁLISIS CINEMÁTICO

COORDENADAS

$$q_{YZ} = \begin{bmatrix} \theta_X \\ \psi_X \end{bmatrix}, q_{XZ} = \begin{bmatrix} \theta_Y \\ \psi_Y \end{bmatrix}, q_{XY} = [\psi_Z]$$

COORDENADAS CARTESIANAS PLANO YZ

$$\begin{bmatrix} y_S \\ z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X + l \sin \psi_X \\ l \cos(\psi_X) \end{bmatrix}$$

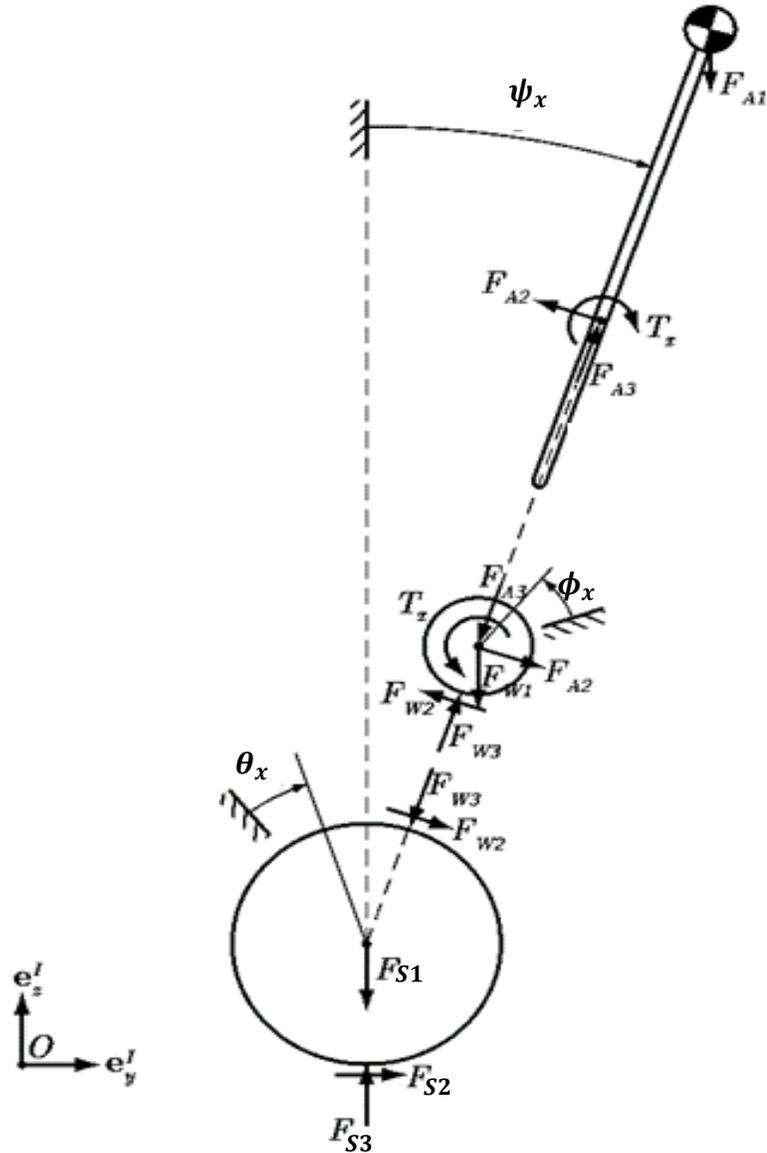
$$\begin{bmatrix} y_W \\ z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X + (r_S + r_W) \sin \psi_X \\ (r_S + r_W) \cos \psi_X \end{bmatrix}$$

COORDENADAS CARTESIANAS PLANO XY

$$\begin{bmatrix} x_{W,xy} \\ z_{W,xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_S + r_W) \cos \psi_Z \\ (r_S + r_W) \sin \psi_Z \end{bmatrix}$$



ANÁLISIS CINÉTICO



Parámetro	Descripción
ϕ_x	Ángulo orientación rueda al eje x
θ_x	Ángulo orientación esfera al eje x
ψ_x	Ángulo orientación cuerpo al eje x
F_{S1}, F_{W1}, F_{A1}	Peso de esfera, rueda y del cuerpo
F_{S2}, F_{W2}, F_{A2}	Fuerza contacto esfera, rueda y cuerpo
F_{S3}, F_{W3}, F_{A3}	Reacciones puntos de contacto esfera, rueda y cuerpo
$\ddot{x}_S, \ddot{x}_W, \ddot{x}_A$	Aceleración esfera, rueda y cuerpo en eje x
$\ddot{z}_S, \ddot{z}_W, \ddot{z}_A$	Aceleración esfera, rueda y cuerpo en eje z
Θ_S	Inercia de la esfera
Θ_W	Inercia de la rueda
Θ_A	Inercia del cuerpo
m_{tot}	Masa total del sistema incluido la esfera



ANÁLISIS CINÉTICO

FUERZAS EN LA ESFERA

EJE X

$$\Sigma F_x = m_S * \ddot{x}_S$$

$$m_S \ddot{x}_S = F_{S2} + F_{W2} \cos \psi_x - F_{W3} \sin \psi_x$$

EJE Z

$$\Sigma F_z = m_S * \ddot{z}_S$$

$$m_S * \ddot{z}_S = F_{S3} - F_{S1} - F_{W2} \sin \psi_x - F_{W3} \cos \psi_x$$

MOMENTO ANGULAR

$$\Theta_S \ddot{\phi}_x = F_{W2} r_S - F_{S2} r_S$$

POTENCIAL

$$F_{S1} = m_S * g$$



ANÁLISIS CINÉTICO

FUERZAS EN LA RUEDA

EJE X

$$m_W \ddot{x}_W = -F_{W2} \cos \psi_x + F_{W3} \sin \psi_x + F_{A2} \cos \psi_x - F_{A3} \sin \psi_x$$

EJE Z

$$m_W \ddot{z}_W = -F_{W1} + F_{W2} \sin \psi_x + F_{W3} \cos \psi_x - F_{A2} \sin \psi_x - F_{A3} \cos \psi_x$$

MOMENTO ANGULAR

$$\Theta_W \ddot{\psi}_x = -F_{W2} r_S + M_x$$

POTENCIAL

$$F_{W1} = m_W * g$$



ANÁLISIS CINÉTICO

FUERZAS EN LA ESTRUCTURA

EJE X

$$m_A \ddot{x}_A = -F_{A2} \cos \psi_x + F_{A3} \sin \psi_x$$

EJE Z

$$m_A \ddot{z}_A = -F_{A1} + F_{A2} \sin \psi_x + F_{A3} \cos \psi_x$$

MOMENTO ANGULAR

$$\Theta_A \ddot{\theta}_X = -F_{A2} (l - r_S - r_W) + M_x$$

POTENCIAL

$$F_{A1} = m_A * g$$



ANÁLISIS CINÉTICO

Fuerzas F_{A2} y F_{A3}

$$F_{A2} = m_A(g \sin \psi_x - r_S \ddot{\theta}_x \cos \psi_x - \ddot{\psi}_x l)$$

$$F_{A3} = m_A(g \cos \psi_x + r_S \ddot{\theta}_x \sin \psi_x - \dot{\psi}_x^2 l)$$

Fuerzas F_{W2} y F_{W3}

$$F_{W2} = (m_A + m_W)(g \sin \psi_x - r_S \ddot{\theta}_x \cos \psi_x) - \zeta \ddot{\psi}_x$$

$$F_{W3} = (m_A + m_W)(g \cos \psi_x + r_S \ddot{\theta}_x \sin \psi_x) - \zeta \dot{\psi}_x^2$$

Fuerzas F_{S2} y F_{S3}

$$F_{S2} = \zeta(\ddot{\psi}_x \cos \psi_x - \dot{\psi}_x^2 \sin \theta_x) + r_S m_{tot} \ddot{\theta}_x$$

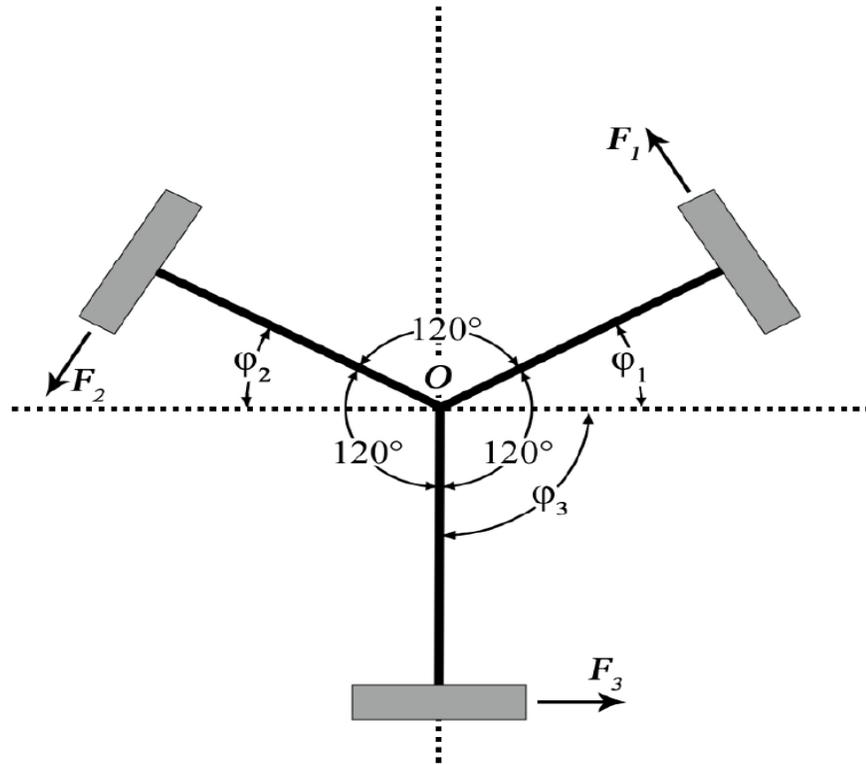
$$F_{S3} = -\zeta(\ddot{\psi}_x \sin \psi_x + \dot{\psi}_x^2 \cos \theta_x) + g m_{tot}$$

$$\zeta = l m_A + (r_S + r_W) m_W$$



ANÁLISIS CINÉTICO

VELOCIDADES ANGULARES RUEDAS



$$\omega_1 = \frac{-0.33v_X + 0.58v_Y + 0.33r\omega_0}{r_W}$$

$$\omega_2 = \frac{-0.33v_X - 0.58v_Y + 0.33r\omega_0}{r_W}$$

$$\omega_3 = \frac{0.67v_X + 0.33r\omega_0}{r_W}$$



ANÁLISIS CINÉTICO

ENERGÍAS EN LA ESFERA

CINÉTICA

$$E_{c_{S,yz}} = \frac{1}{2} m_S r_S^2 \omega_S^2 + \frac{1}{2} I_S \omega_S^2$$

POTENCIAL

$$E_{p_{S,yz}} = 0$$



ANÁLISIS CINÉTICO

ENERGÍAS EN LA RUEDA

CINÉTICA

$$E_{C_{W,yz}} = \frac{1}{2} m_W (r_S^2 \omega_S^2 + 2r_S(r_S + r_W) \omega_S \dot{\psi}_X \cos \psi_X + (r_S + r_W)^2 \dot{\psi}_X^2) + \frac{1}{2} I_W \left(\frac{r_S}{r_W} (\omega_S - \dot{\psi}_X) \right)^2$$

POTENCIAL

$$E_{p_{W,yz}} = m_W g (r_S + r_W) \cos \psi_X$$



ANÁLISIS CINÉTICO

ENERGÍAS EN LA ESTRUCTURA

CINÉTICA

$$E_{C,yz} = \frac{1}{2} m_A (r_S^2 \omega_S^2 + 2r_S * l * \omega_S \dot{\psi}_X \cos \psi_X) + \frac{1}{2} (I_C + m_A l^2) \dot{\psi}_X^2$$

POTENCIAL

$$E_{pC,yz} = m_A g * l * \cos \psi_X$$



DESEÑO MECÁNICO

PARÁMETROS DE DISEÑO

Peso estimado de la estructura=10kg

Velocidad de desplazamiento=0.35m/s

Cantidad de motores=3

Cantidad de amortiguadores=3

Diámetro de la esfera=220mm

Altura máxima=1000mm

Ancho máximo=400mm

Ángulo de separación entre motores=120°

Ángulo de inclinación de motores=45°

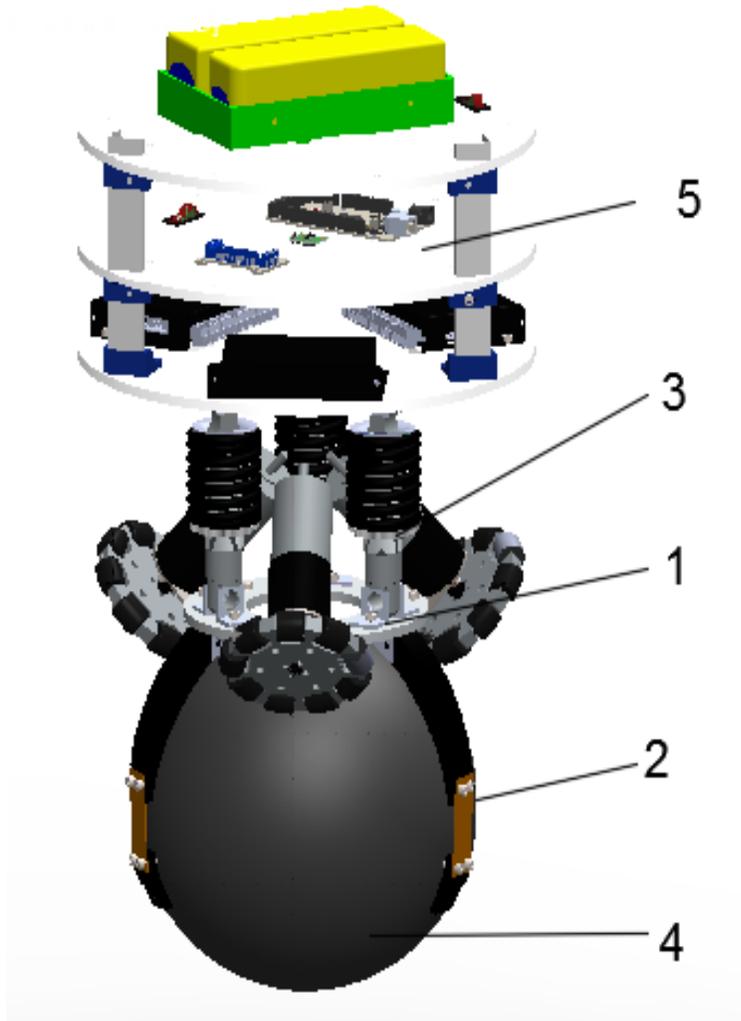
Ángulo de separación ente amortiguadores=120°

Ángulo de separación tarjetas de control=120°

Desplazamiento máximo amortiguadores=2mm

DESEÑO MECÁNICO

DISEÑO GEOMÉTRICO

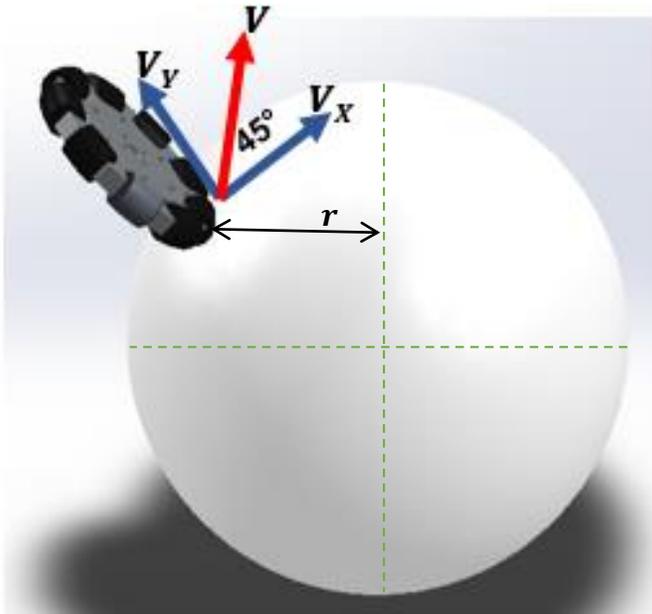


- Chasis del prototipo
- Garras de sujeción
- Amortiguadores
- Esfera
- Cuerpo superior



CÁLCULOS CINÉTICOS

VELOCIDADES ANGULARES RUEDAS



$$\omega_1 = \frac{\left(-0,33 \left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,58 \left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))\right)}{0,05m} = 1,25 rad/s$$

$$\omega_1 = 1,25 rad/s = 11,94 RPM$$

$$\omega_2 = \frac{\left(-0,33 \left(\frac{0,24m}{s}\right) - 0,58 \left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))\right)}{0,05m} = -4,3 rad/s$$

$$\omega_2 = -4,2 rad/s = -40,1 RPM$$

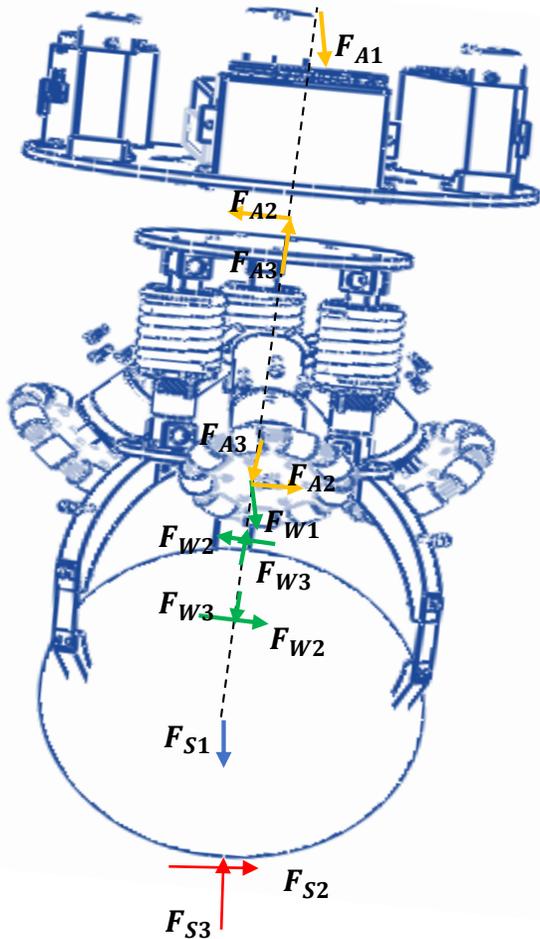
$$\omega_3 = \frac{0,67 \left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))}{0,05m} = 3,27 rad/s$$

$$\omega_3 = 3,27 rad/s = 31,23 RPM$$



CÁLCULOS CINÉTICOS

FUERZAS DEL SISTEMA



$$F_{S1} = 3kg * 9.8 m/s^2 = 29.4N$$

$$F_{W1} = 3.3kg * 9.8 m/s^2 = 32.34N$$

$$F_{A1} = 5.7kg * 9.8 m/s^2 = 55.86N$$

$$F_{A2} = 5.7kg(9.8 m/s^2 * \sin 20^\circ) = 19.11N$$

$$F_{A3} = 5.7kg(9.8 m/s^2 * \cos 20^\circ) = 52.49N$$

$$F_{W2} = (5.7kg + 3.3kg)(9.8 m/s^2 * \sin 20^\circ) = 30.17N$$

$$F_{W3} = (5.7kg + 3.3kg)(9.8 m/s^2 * \cos 20^\circ) - 1.95kgm(3.89 rad/s)^2 = 53.37N$$

$$F_{S2} = 1.95kgm((3.89 rad/s)^2) = 10.09N$$

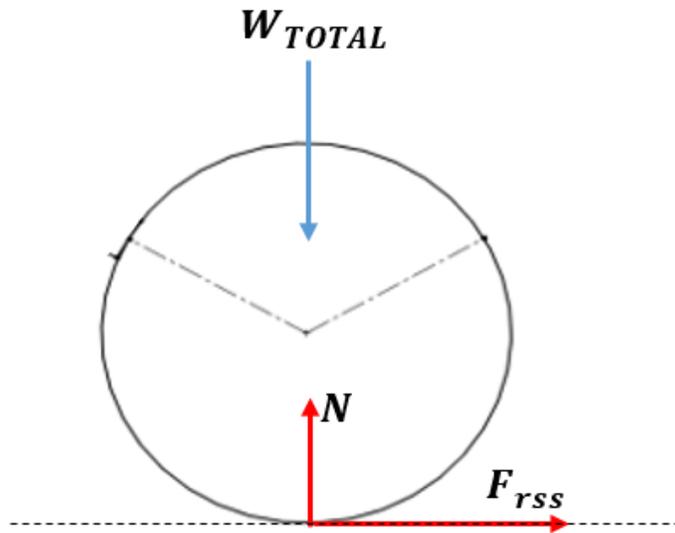
$$F_{S3} = -1.95kgm((3.89 rad/s)^2 \cos 20^\circ) + 9.8 m/s^2 * 12kg = 89.87N$$



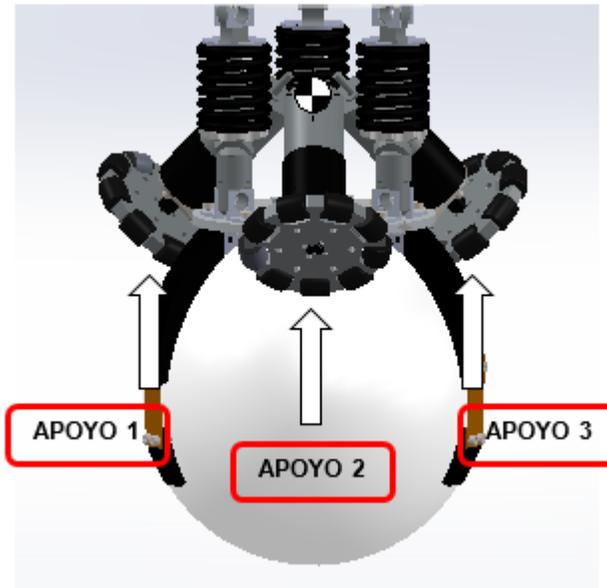
CÁLCULOS CINÉTICOS

FUERZAS DE ROZAMIENTO

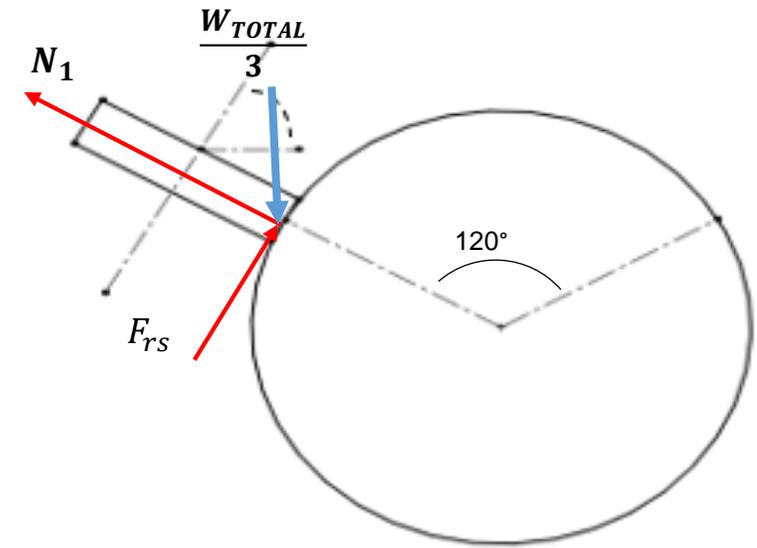
$$F_{r_{ss}} = \mu * N$$



$$F_{r_{ss}} = 0.75 * 88.2N = 66.15N$$



$$F_{eys} = 0.56 * 3kg * \left(\frac{3.18rad}{s} \right)^2 * 0.11m = 1.87N$$



$$F_{rs} = 1.6 * 14.7N = 23.52N$$



CÁLCULOS CINÉTICOS

ENERGÍAS CINÉTICA Y POTENCIAL

ESFERA

$$E_{c,s,yz} = \frac{1}{2}(3kg)(0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s}\right)^2 + \frac{1}{2}(2.43 * 10^{-2} kgm^2) \left(\frac{3.18rad}{s}\right)^2 = 0.367J$$

RUEDA

$$E_{cW,yz} = \frac{1}{2}(3.3kg) \left((0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s}\right)^2 + 2(0.11m)(0.16m) \left(\frac{3.18rad}{s}\right) \left(\frac{3.89rad}{s}\right) \cos 20^\circ + (0.16m)^2 \left(\frac{3.89rad}{s}\right)^2 \right) + \frac{1}{2}(1.685 * 10^{-4} kg m^2) \left(\left(\frac{0.11m}{0.05m}\right) \left(\frac{3.18rad}{s} - \frac{3.89rad}{s}\right) \right)^2 = 1.5164J$$

$$E_{pW,yz} = 3.3kg \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) (0.16m) \cos 20^\circ = 4.86J$$

ESTRUCTURA

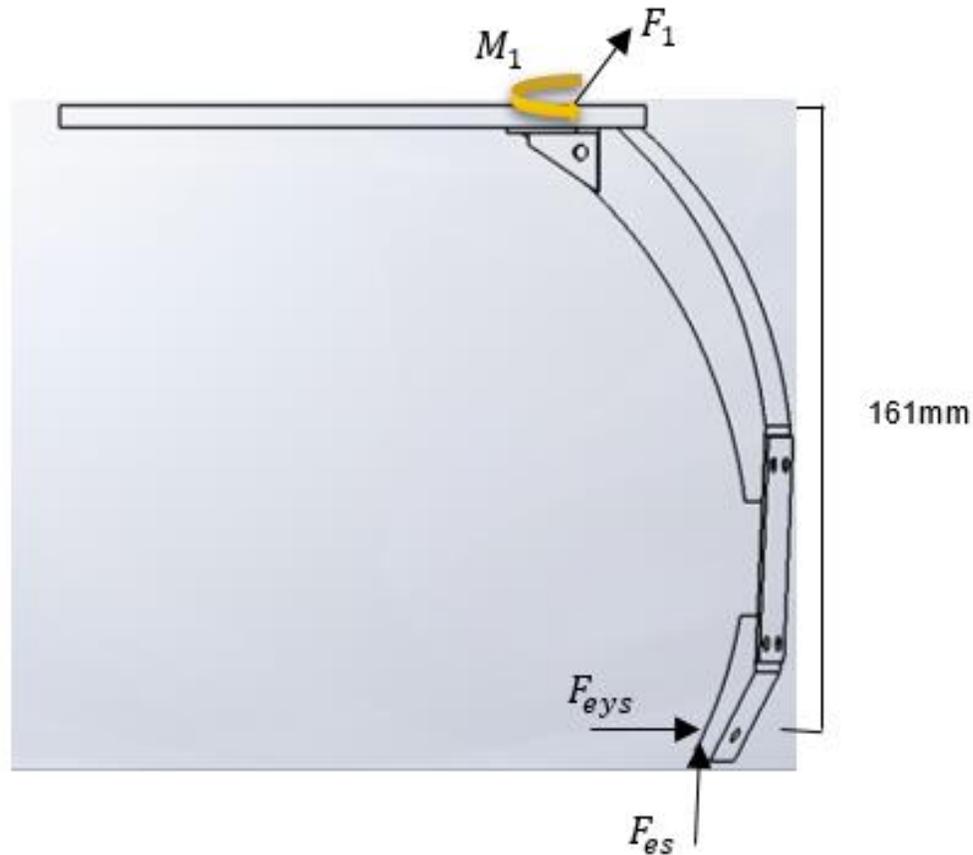
$$E_{cC,yz} = \frac{1}{2}(5.7kg) \left((0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s}\right)^2 + 2(0.11m)(0.25m) \left(\frac{3.18rad}{s}\right) \left(\frac{3.89rad}{s}\right) \cos 20^\circ \right) + \frac{1}{2}(0.157kg m^2 + 5.7kg(0.25m)^2) \left(\frac{3.89rad}{s}\right)^2 = 4.31J$$

$$E_{pC,yz} = 5.7kg \left(\frac{9.8m}{s^2}\right) * (0.25m) \cos 20^\circ = 13.22J$$



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOMENTOS FLECTORES

GARRA DE SUJECCIÓN



$$F_{1x} = F_{eys} = 1.87N$$

$$F_{1y} = F_{eys} = 1.87N$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{1.87N}{1.87N}\right) = 45^\circ$$

$$F_1 = \sqrt{1.87^2 + 1.87^2} = 2.64N$$

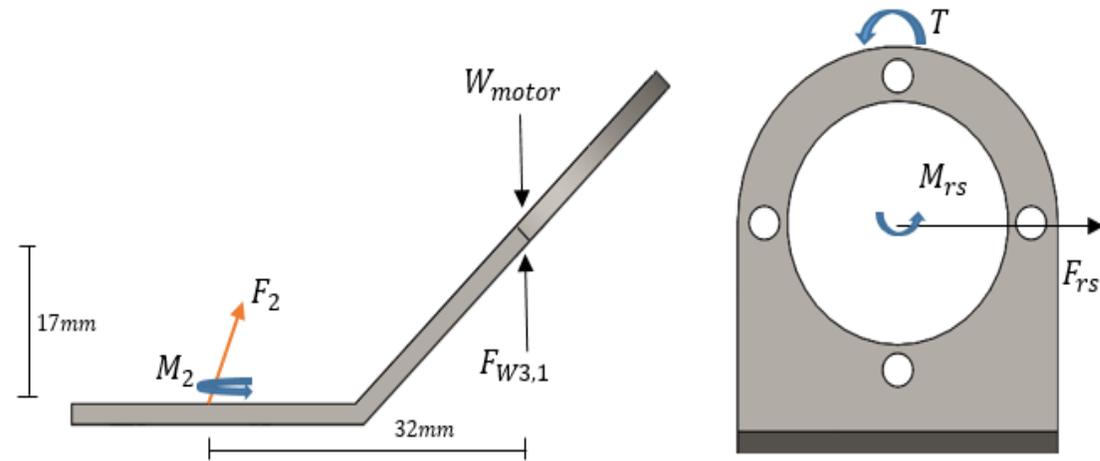
$$M_1 = F_{eys} * 0.161m + F_{es} * 0.161m$$

$$M_1 = 1.87N * 0.161m + 1.87N * 0.161m = 0.6Nm$$



ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOMENTOS FLECTORES

ACOPLE MOTOR



$$F_{W3,1} = \frac{F_{W3}}{3} = \frac{53.37N}{3} = 17.79N$$

$$M_{rs} = F_{rs} * 0.05m = 23.52N * 0.05m = 1.76Nm$$

$$F_2 = \sqrt{23.52^2 + 7.01^2} = 24.54N$$

$$M_2 = F_{W3,1} * 0.17m + F_{rs} * 0.32m + T_{rs} + T - W_{motor} * 0.17m$$

$$M_2 = (17.79N * 0.17m) + (23.52N * 0.32m) + (23.52N * 0.05m) + 2.54Nm - (10.78N * 0.17m)$$

$$M_2 = 12.43Nm$$



SELECCIÓN COMPONENTES MECÁNICOS

MOTOR

$$P = \frac{24.27J}{0.1seg} = 229.71W$$

$$P_r = \frac{229.71W * 1.1}{0.87} = 290.44 W$$

$$P_{MOTOR} = \frac{P_r}{3} = \frac{290.44W}{3}$$

$$P_{MOTOR} = 96.81 W$$



Característica	Valor
Potencia	100w
Voltaje	18v
Corriente pico(rotor parado)	5.46 A
Eficiencia	87
Velocidad sin carga	4540 rpm
Peso	0.39kg
Reducción mecánica	No
Tarjeta de control	Si
Sensores incluidos	Si
Precio(Al 2017)	270\$



SELECCIÓN COMPONENTES MECÁNICOS

REDUCTOR

$$W_{MOTOR} = \text{Velocidad Motor} = 1000 \text{ RPM}$$

$$RPM_{requerida} = RPM_w = \omega_w * \frac{60\text{seg}}{2\pi} = \frac{7\text{rad}}{s} * \frac{60\text{seg}}{2\pi} = 66.84\text{RPM}$$

$$\text{Reductor} = \frac{RPM_{MOTOR}}{RPM_{requerida}}$$

$$\text{Reductor} = \frac{1000 \text{ RPM}}{66.84 \text{ RPM}} = 14.95$$



Reductor GP	
Parámetro	Característica
Engranaje planetario	Diente derecho
Eje salida	Acero inoxidable
Cojinete salida	Rodamiento de bolas
Reducción	12:1
Diámetro eje salida	12mm
Diámetro máx. eje motor	10mm
Máxima carga axial	150N
Temperatura	-40°...+100°C



SELECCIÓN COMPONENTES MECÁNICOS

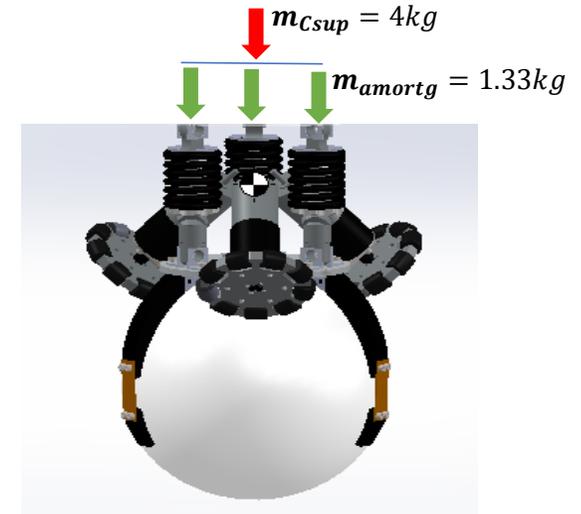
AMORTIGUADOR

$$k = \frac{F}{x}$$

$$F = m_{amortg} * 9.8 m/s^2$$

$$F = 1.33kg * 9.8 m/s^2 = 13.06N$$

$$k = \frac{13.06N}{2mm} = 6.53 N/mm \approx 37.29lb f/plg$$



Suspensión Ke Zhen 50	
Parámetro	Característica
Distancia entre centros	150mm
Tipo de suspensión	Resorte
Peso	400g
Eje	Incluido
Precarga	Ajustable por rosca
Constante de resorte incluido	50lb/in



SELECCIÓN COMPONENTES MECÁNICOS

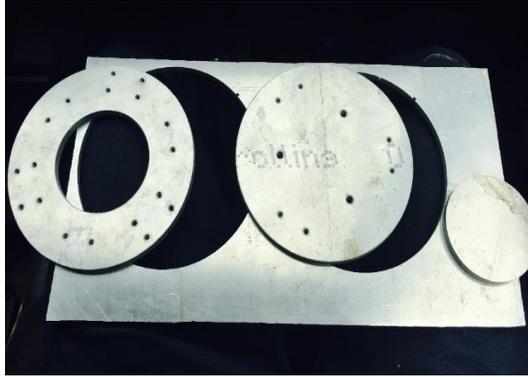
RUEDA OMNIDIRECCIONAL



Rueda omnidireccional	
Parámetro	Característica
Marca	SZDLT
Diámetro	100mm
Diámetro del rodillo	18mm
Conexión del rodillo	Cojinete de acero
Material del cuerpo	Nylon
Material rollers	Caucho
Capacidad de carga	20kg
Peso	290g



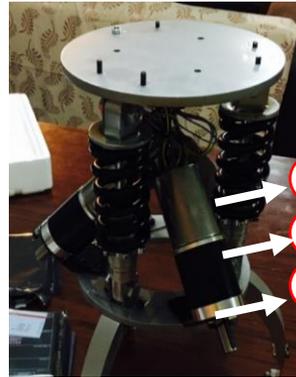
CONSTRUCCIÓN CHASIS



CONSTRUCCIÓN CHASIS



Acople de
rueda



1. Motor
2. Reductor
3. Acople de motor



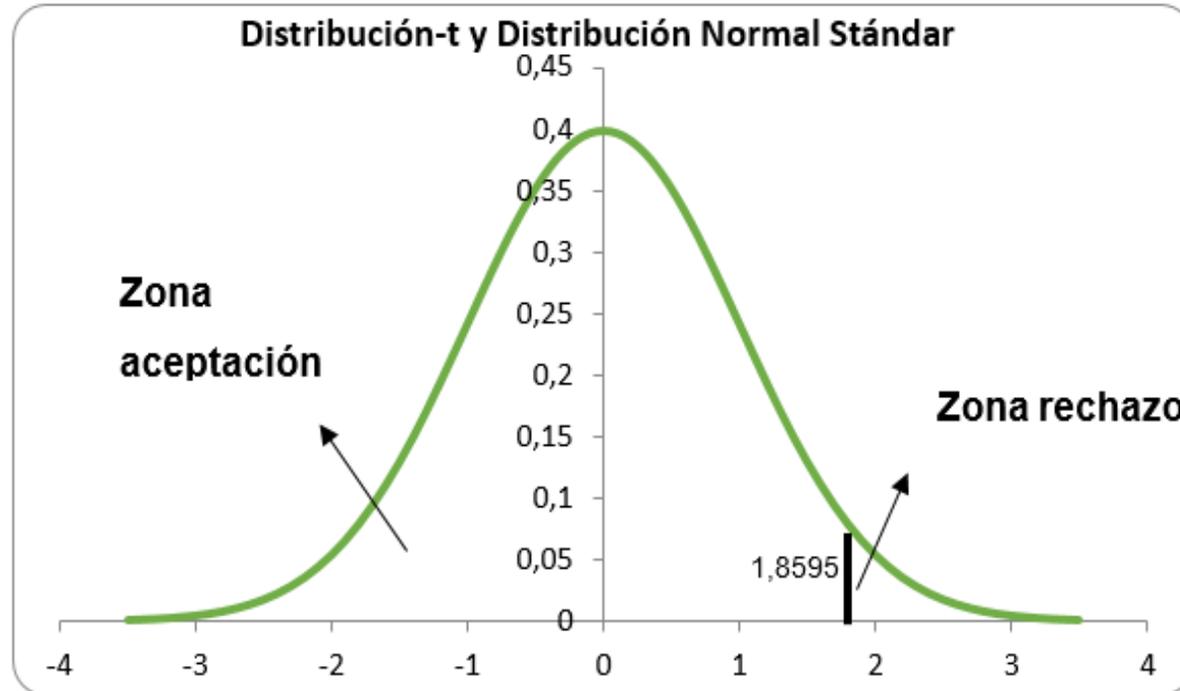
CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO FINAL



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS Y RESULTADOS

VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS



Hipótesis nula H_0 = no mejora tiempos de ejecución de movimientos
Hipótesis alternativa H_i = mejora tiempos de ejecución de movimientos
 $H_i < H_0$

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{X_1 X_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

$$S_{X_1 X_2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_{X_1}^2 + (n_2 - 1)S_{X_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

$$t_1 = \frac{25.46 \text{seg} - 45.57 \text{seg}}{1.032 \text{seg} * 0.6324} = -30.81$$

$$t_2 = \frac{23.62 \text{seg} - 36.16 \text{seg}}{0.7405 \text{seg} * 0.6324} = -26.77$$



CONCLUSIONES

- Las evaluaciones realizadas como maniobrabilidad en espacios reducidos, rotación alrededor de un obstáculo y desplazamientos, del prototipo robot rueda esférica con una plataforma omnidireccional, obteniendo una mejora en el tiempo de ejecución de rotaciones en un 535.65% y el tiempo para sorteo de obstáculos en un 166.03%, en comparación con plataformas omnidireccionales.
- Para desplazamientos lineales el robot rueda esférica fue superado por la plataforma omnidireccional, esto se debe a que la plataforma omnidireccional tiene un mejor agarre a la superficie al poseer cuatro puntos de contacto al suelo lo que lo vuelve estable, en cambio, el robot rueda esférica debe realizar un control constante de estabilidad por ser un sistema netamente inestable.
- Al evaluar el prototipo en diferentes suelos, se obtiene que la superficie de mármol es la más adecuada para realizar desplazamientos y rotaciones del prototipo, con un tiempo para llegar a la estabilidad de 1.13seg para inclinaciones desde 0° a 20°.



CONCLUSIONES

- El brazo de soporte permite compensar el retardo del tiempo de ejecución del algoritmo de control de 0,1seg, permitiendo la respuesta adecuada de las velocidades y sentidos de giro de los motores para corregir el error de inclinación y mantener al prototipo en estabilidad.
- La velocidad de 1000rpm en los motores facilita acciones de control para estabilidad del prototipo y la atenuación del cambio de sentido de giro, permitiendo el censado óptimo de inclinación en los ejes por parte del sensor MPU6050.



RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos se recomienda aumentar la velocidad de desplazamiento que le permita al robot rueda esférica superar de manera contundente en todos los aspectos a las plataformas omnidireccionales, también se le puede incorporar un control de trayectorias definidas por parte del operador.
- Se recomienda realizar investigaciones enfocados a técnicas de control estratégico para mejorar el algoritmo de control y así permitir una mejora en la estabilidad del robot rueda esférica.
- Aplicar nuevos filtros para lectura de las señales del sensor IMU para evitar valores no deseados ocasionados por el medio, ruido o eventualidades.
- Mantener el centro de gravedad lo más cercano a los actuadores del prototipo.
- Realizar simulaciones que impliquen la integración de la parte mecánica y de control con parámetros muy apegados al entorno real para identificar falencias antes de la implementación del prototipo.

