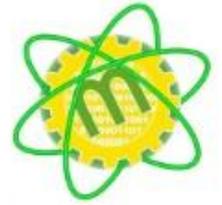




# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**TEMA:** “ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO OMNIDIRECCIONAL PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS CON CONTROL AUTÓNOMO, OPTIMIZANDO SU DESPLAZAMIENTO EN AMBIENTES CON MOVILIDAD REDUCIDA”

**AUTORAS:**

- CÁRDENAS ZUMBA, SCARLET GISSELL
- ORTIZ ALVARADO, PAMELA YAJAIRA

**DIRECTOR:**

ING. OSCAR ARTEAGA



# CONTENIDO

Resumen

Objetivos

Sistema Omnidireccional

Diseño Mecánico

Diseño Electrónico

Pruebas y Resultados

Conclusiones y Recomendaciones



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

# RESUMEN



La silla de ruedas omnidireccional es una silla de ruedas eléctrica con características de funcionamiento innovadoras, permite un número mayor de desplazamientos gracias a la integración de cuatro ruedas omnidireccionales.

Cuenta con dos tipos de control: manual y autónomo.

Ambos controladores comandados mediante una aplicación móvil descargada desde Play Store, disponible para cualquier dispositivo Android.



# OBJETIVOS

## Objetivo General

- Estudiar los parámetros del movimiento omnidireccional para diseñar y construir una silla de ruedas con control autónomo, optimizando su desplazamiento en ambientes con movilidad reducida.

## Objetivo Específicos

- Estudiar la cinemática y cinética del movimiento omnidireccional, para el desplazamiento de la silla de ruedas.
- Investigar las propiedades tecnológicas y físicas de diferentes tipos de estructuras para sillas de ruedas omnidireccionales.



## Objetivo Específicos

- Diseñar la estructura de la silla de ruedas omnidireccional y un mecanismo que provea comodidad para el usuario.
- Construir la silla de ruedas en conjunto con el mecanismo para la movilidad de las ruedas, que proporcionen los movimientos necesarios para generar desplazamientos en espacios reducidos.
- Implementar el control autónomo y manual, que permita el accionamiento de los actuadores de cada rueda para su movimiento omnidireccional.
- Realizar evaluaciones experimentales de la silla de ruedas omnidireccional y su comportamiento en base al algoritmo de control propuesto.



# SISTEMA OMNIDIRECCIONAL



## Locomoción Omnidireccional



Sistema de locomoción poco convencional, proporcionan una amplia gama de desplazamientos sin necesidad de reorientarse como en cualquier otro tipo de sistema de locomoción gracias a ruedas omnidireccionales

- Adelante
- Atrás
- Diagonal
- Lateral
- Giro en su propio eje

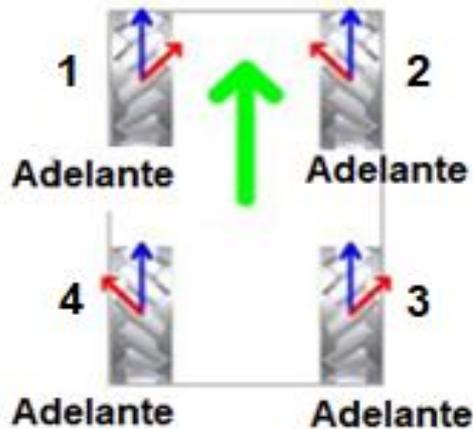


## Movimiento Omnidireccional

Las ruedas mecanum realizan cierto tipo de combinaciones según la dirección del desplazamiento.

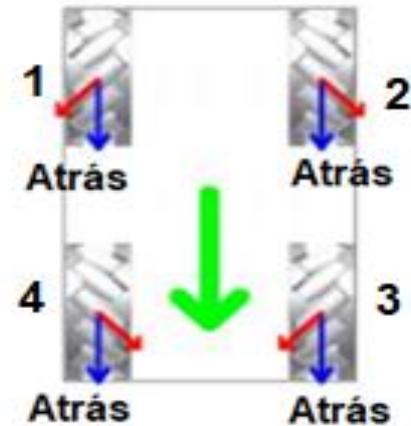
**Adelante** (↑)

Desplazamiento de 4 llantas a velocidad total



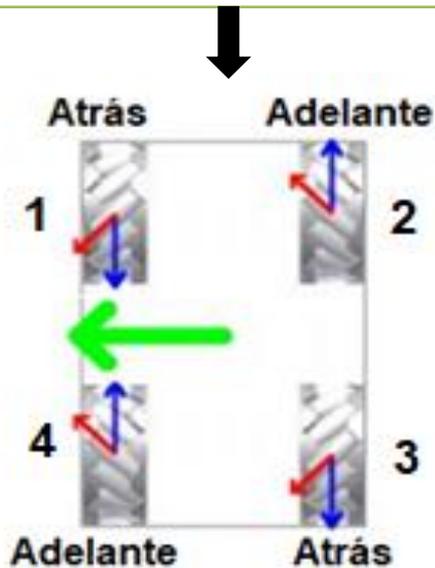
**Atrás** (↓)

Desplazamiento de 4 llantas a velocidad total



### Izquierda (←)

Desplazamiento de 4 llantas a velocidad total



### A 45° (↗)

Únicamente las llantas 1 y 3 a velocidad mayor para compensar la falta de las otras dos.



### Giro en el propio eje en sentido horario (↻)

Desplazamiento de 4 llantas a velocidad total



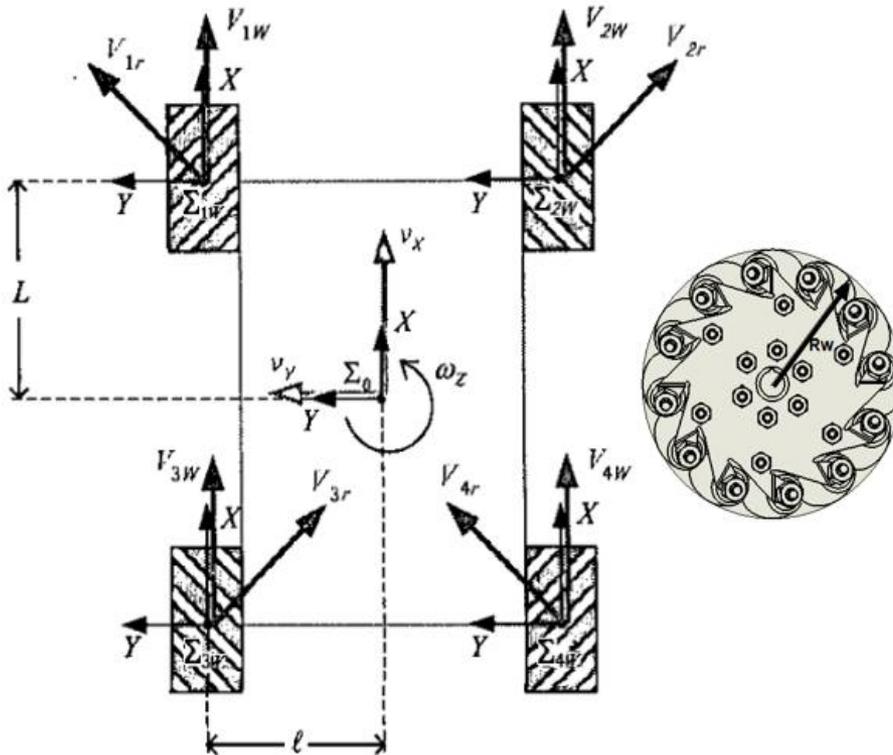
# DISEÑO MECÁNICO

## Parámetros de Diseño

PARÁMETROS	DEFINICIÓN
Carga máxima	Se establece una carga máxima de 80 kg
Peso de la silla de ruedas	El peso máximo es de 30 kg .
Dimensiones máximas de la silla de ruedas	Diseñadas de acuerdo a la norma ISO 7176 – 5. <ul style="list-style-type: none"><li>• Longitud: 1200 mm</li><li>• Ancho: 700 mm.</li><li>• Altura: 1100 mm.</li></ul>
Velocidad máxima	La velocidad máxima es de 0,85 m/s
Pendiente máxima y grado de inclinación de la rampa	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pendiente máx: 12%</li><li>• Grado de inclinación: 7°</li></ul>



## Diseño Cinemático



$$v_x = \frac{R_W}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)$$

$$v_y = \frac{R_W}{4} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4)$$

$$\omega_z = \frac{R_W}{4(L+l)} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)$$



## Selección de componente mecánicos

### Rueda Mecanum RB-Next-74



CARACTERÍSTICA	VALOR
Diámetro	8 in = 203.2 mm
Ancho	78mm
Numero de Rodillos	12
Material del rodillo	Nylon
Longitud del rodillo	67mm
Capacidad de carga	150 kg
Peso Unitario	2.5 kg



## Selección de componente mecánicos

**Motor  
NPC-2212**



CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje	12 V
Velocidad	285 rpm
Relación de transmisión	21:1
Peso	5.1lb (2.31 kg)

## Diseño Cinemático

### Cálculo de Velocidades

- $v_X = \frac{R\omega}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)$
- $v_y = \frac{R\omega}{4} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4)$

$$v_X = 3.03 \frac{m}{s} = v_y = 3.03 \frac{m}{s}$$

$$\text{Factor reductor} = \frac{1}{5}$$

$$v_X = 0,60 \frac{m}{s} = v_y = 0,60 \frac{m}{s}$$

$$v_{obj} = \sqrt{(v_{X(prog)})^2 + (v_{y(prog)})^2}$$

$$v_{obj} = 0.85 \frac{m}{s}$$

### Datos

- $\Phi_{llanta} (R_\omega) = 8in = 203.2mm$
- $2R_\omega = 0.1016m$
- $\omega_{llanta} = \dot{\theta} = 285rpm = 29.84 \text{ rad/s}$



# Diseño Cinético

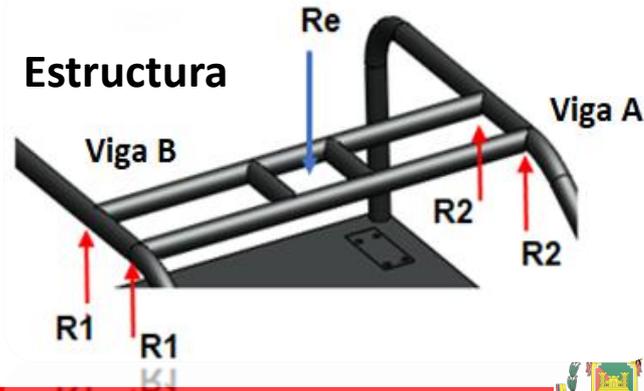
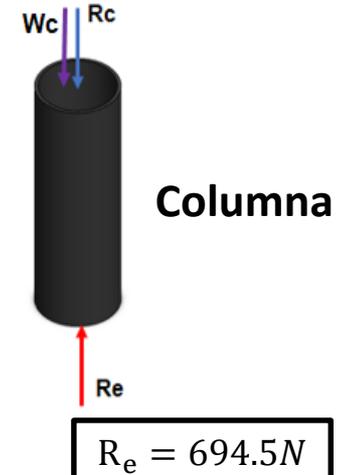
## Determinación de Cargas

Persona = 80kg

- Muslos y Nalgas = 65 % = 52 kg
- Pies = 19 % = 15.2 kg
- Espalda = 12 % = 9.6 kg
- Antebrazos = 4 % = 3.2 kg

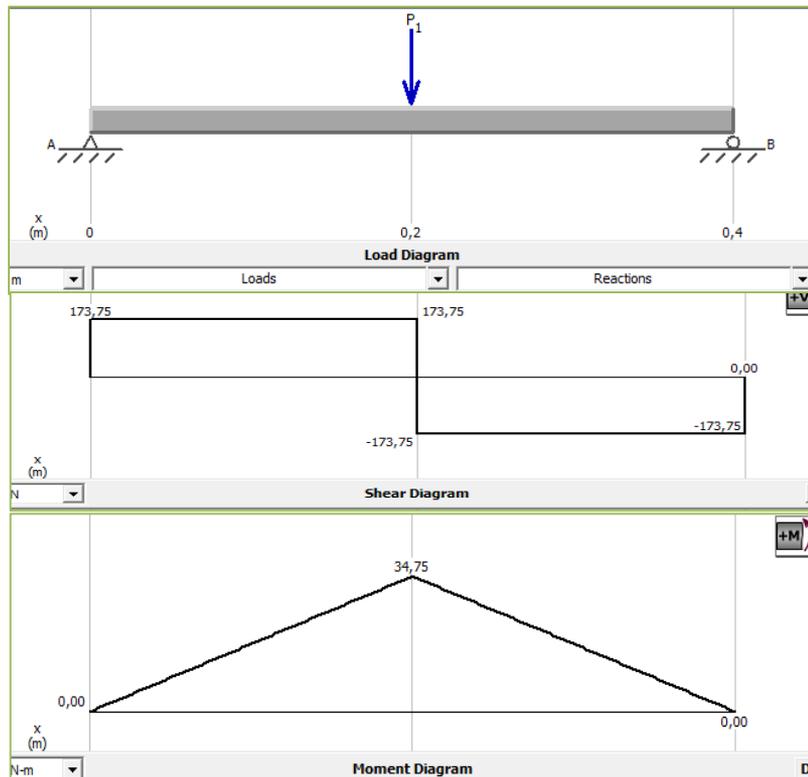
### Silla de Ruedas

- Asiento = 5.5 kg
- Columna = 0.5 kg
- Estructura = 24 kg



## Estructura

- Las 2 vigas horizontales miden 40 cm y un diámetro de  $\frac{3}{4}$  in = 19.05mm y 2mm.



Al ser dos vigas paralelas, el valor de la fuerza de la reacción  $R_e = 695$  N se reparte en partes iguales obteniendo una fuerza equivalente a  $P_1 = 347.5$  N para el análisis de cada viga.

$$V \equiv 347.25 \text{ N}$$

$$M = 34.75 \text{ Nm}$$



## Material: Acero ASTM A36

### CARACTERÍSTICAS DEL TUBO de 3/4 " DE ACERO ASTM A36

Tubería Estructural	Tubo Redondo
Diámetro exterior	3/4 " = 19.05 mm
Espesor	2 mm
Esfuerzo a la cedencia	250MPa

$$\sigma_{x flex} = \frac{M}{S}$$

$$S = \frac{\pi}{32} \left( \frac{D^4 - d^4}{D} \right) = 798.17 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{x flex} = \frac{34.75 \text{ Nm}}{798.16 \text{ mm}^3} = 43.54 \text{ MPa}$$



$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

$$\sigma_1 = 43.54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

$$\sigma_2 = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 - (\sigma_1)(\sigma_2)}$$

$$\sigma' = 43.54 \text{ MPa}$$

**Esfuerzo de Von Mises**

$$fs_c = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$fs_c = 5.74$$

**Factor de seguridad**

$$fs_d < fs_c$$

$$4 < 5.74$$

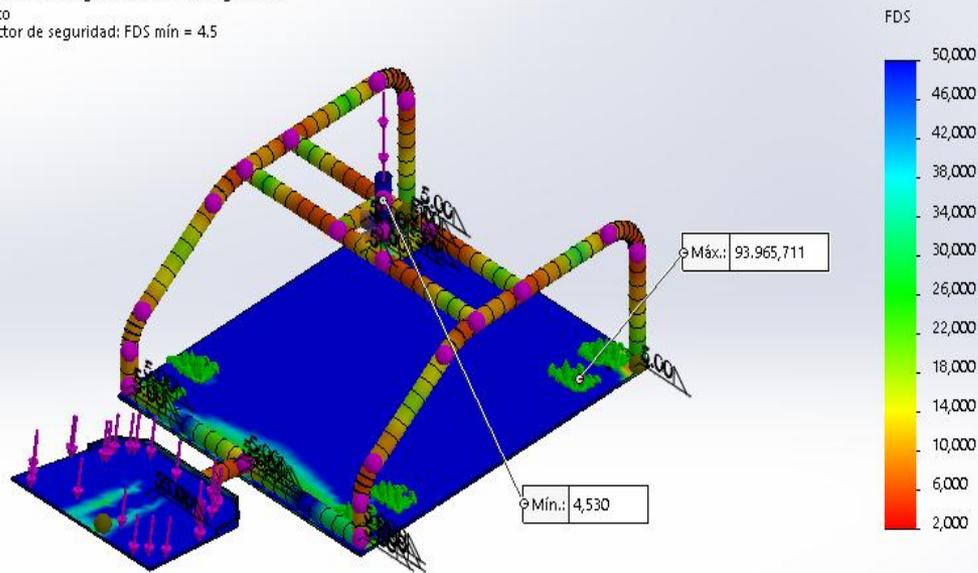
**Diseño seguro**



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

## Factor de seguridad

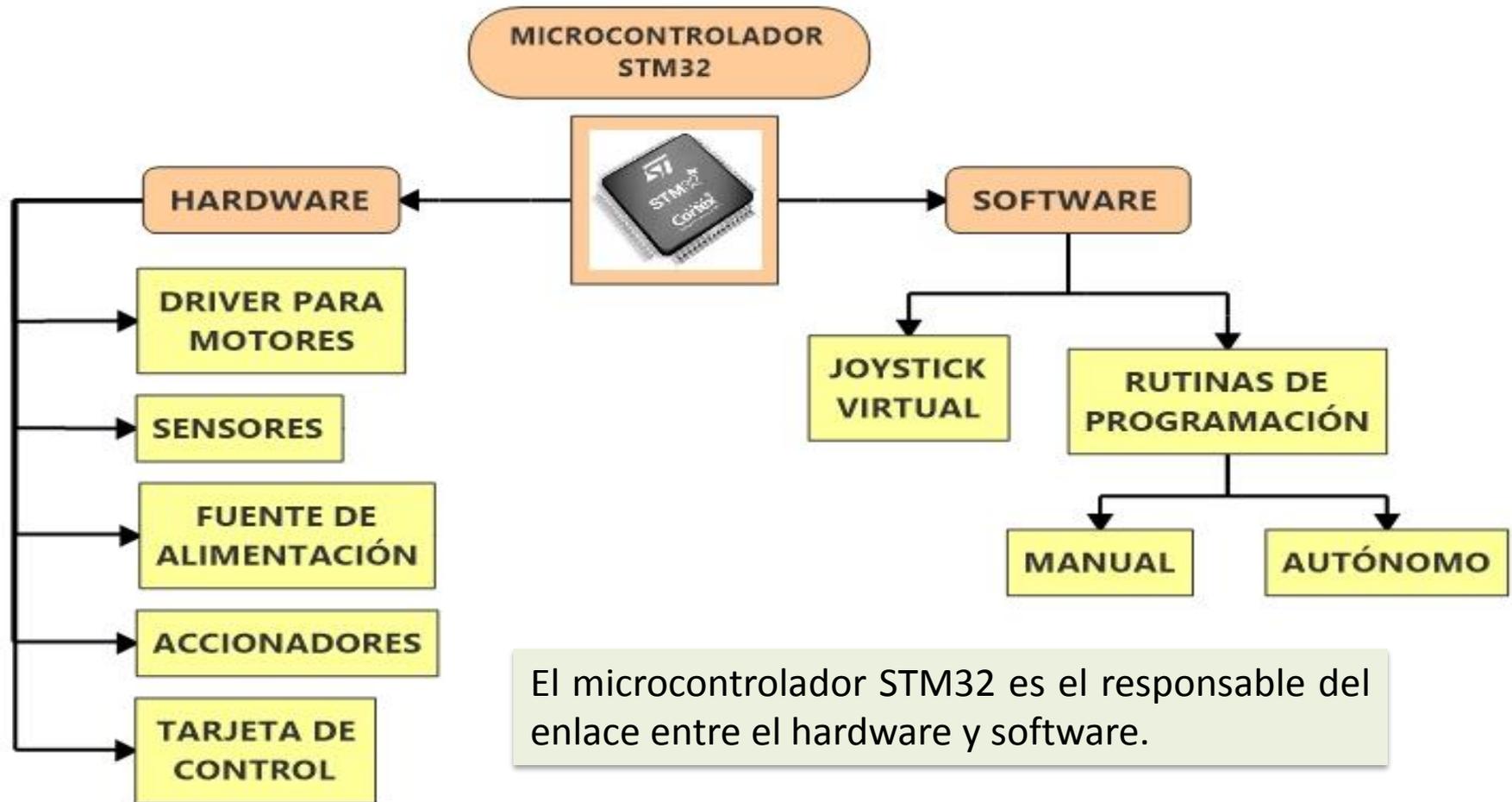
Nombre de estudio: Análisis estático 1[-Predeterminado-< Como mecanizada>-]  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 4.5



El mínimo valor se encuentra en la sección que soporta el asiento y el peso de la persona y es de 4.54, el cual sobrepasa el límite de 4 requerido como se explica en los parámetros de diseño



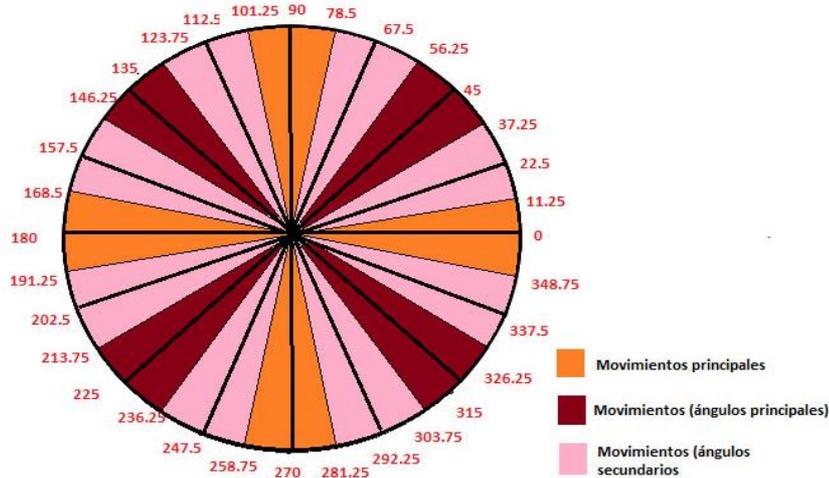
# DISEÑO ELECTRÓNICO



# Rutinas de programación

## Mando Manual

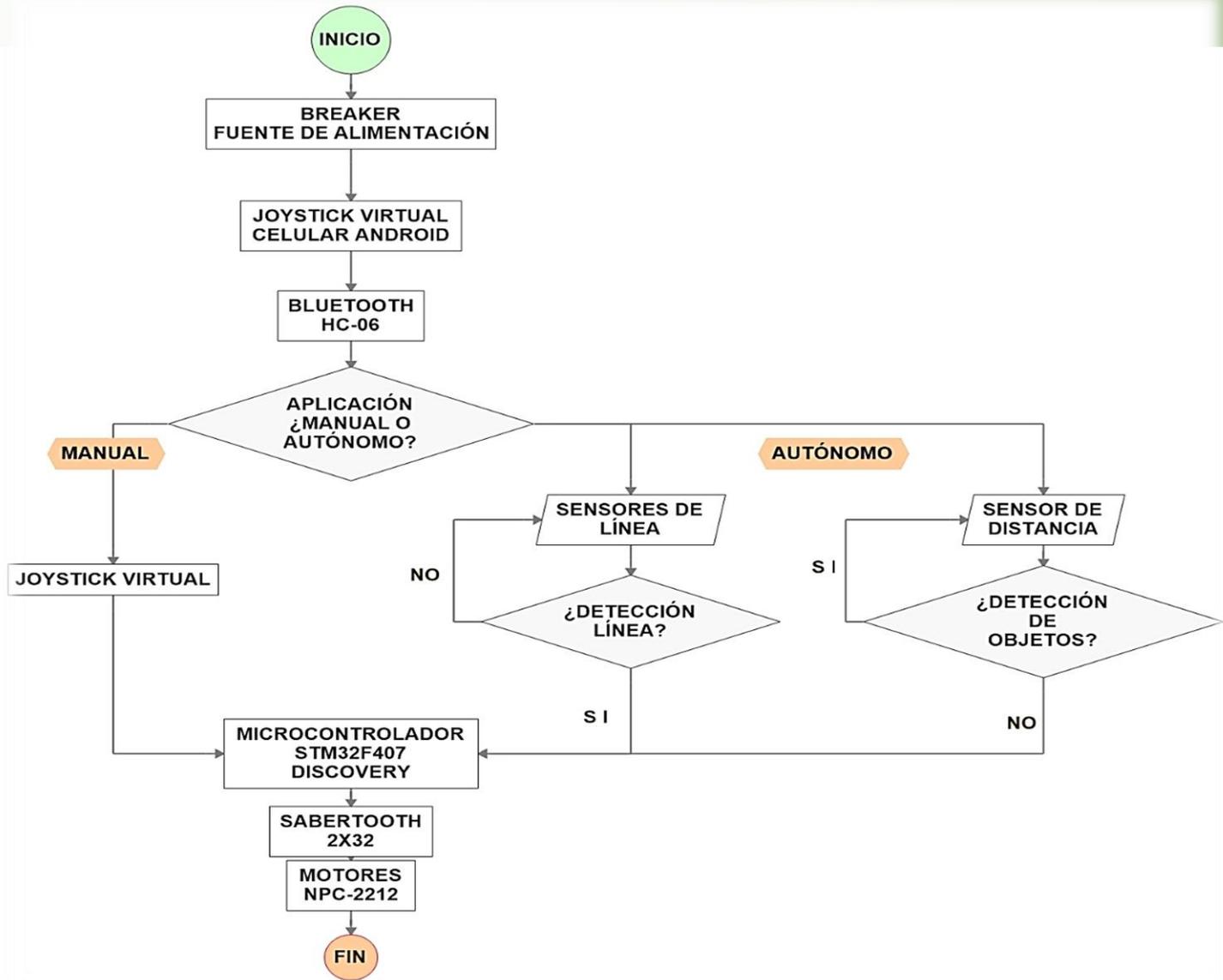
En el modo manual, la silla de ruedas posee la capacidad de trasladarse en torno a 360° de acuerdo a la locomoción omnidireccional

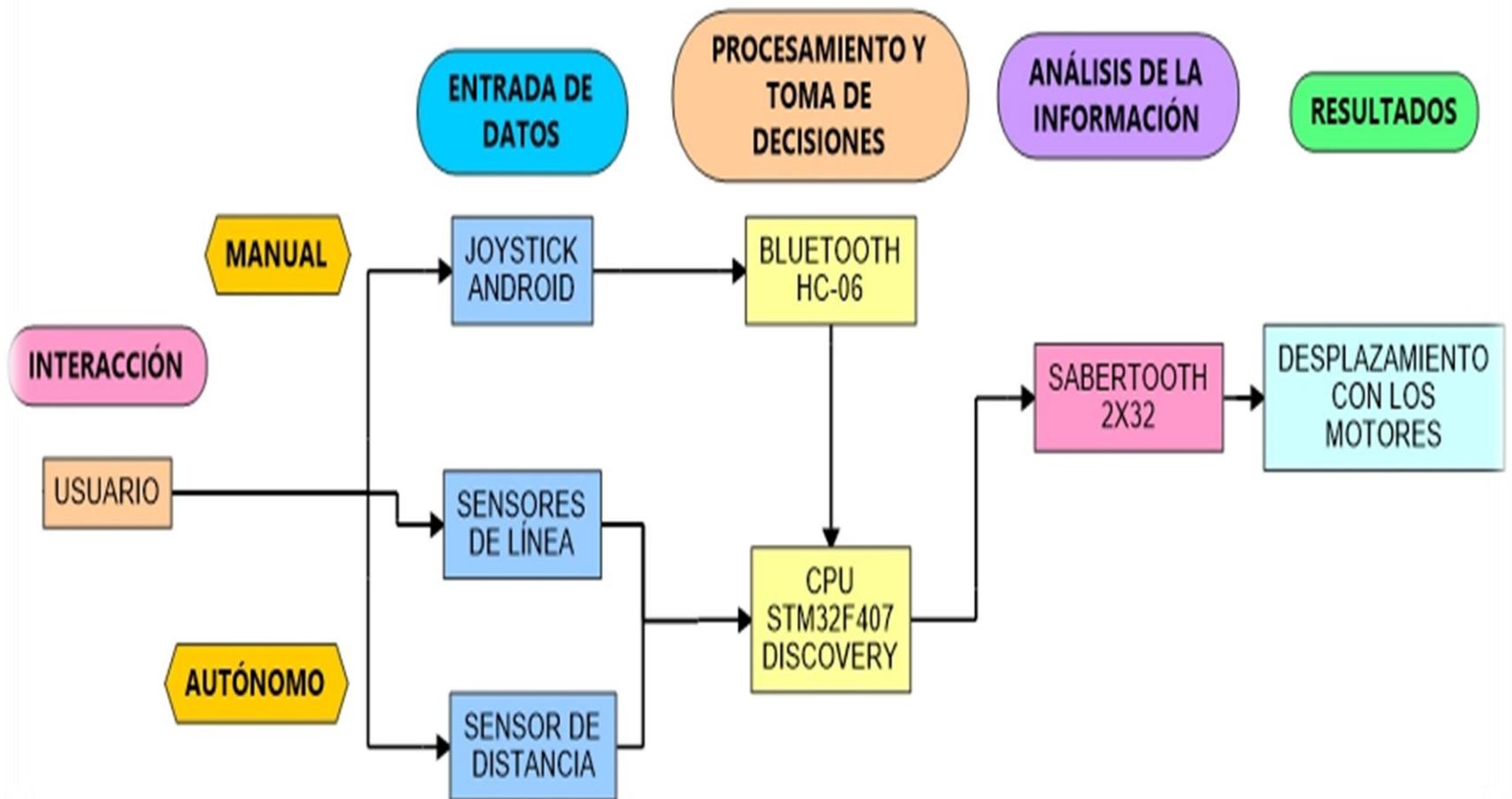


## Mando Autónomo

En el modo autónomo, se realizaron rutinas de programación entorno al seguimiento de una trayectoria establecida y detección de obstáculos, tomando en cuenta que el sensor de línea realiza un control proporcional, el cual se encarga de verificar en un determinado tiempo que el direccionamiento de la silla de ruedas permanezca a lo largo de la trayectoria.





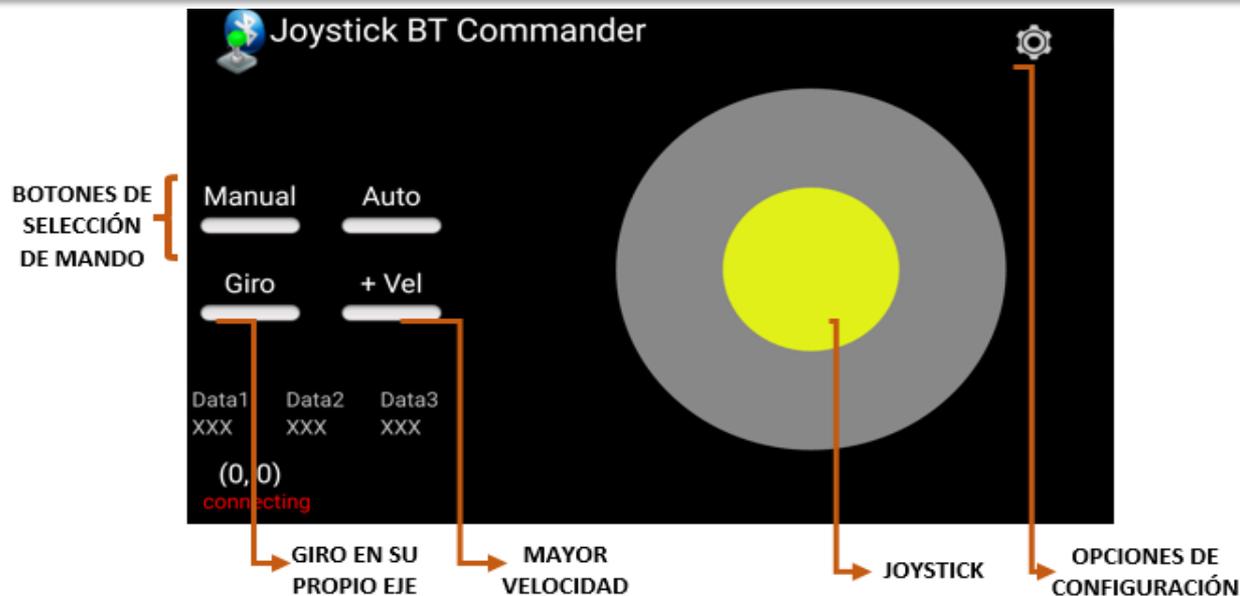


# Software

## Aplicación Joystick Bt Comander



El mando de control que se seleccionó para ejecutar los movimientos de la silla de ruedas omnidireccional es un joystick virtual, este controlador se encuentra disponible mediante una aplicación móvil en la tienda Play Store y es accesible para los usuarios de Android.

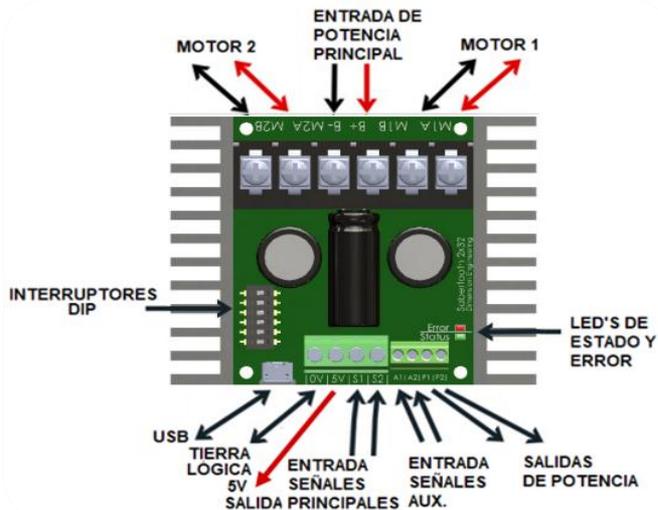


# Hardware

## Selección de Componentes Electrónicos

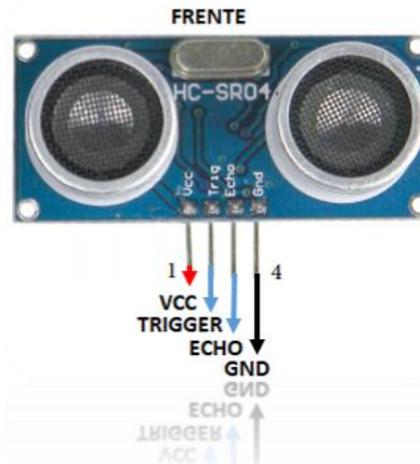
Driver para motores

Sabertooth 2x32

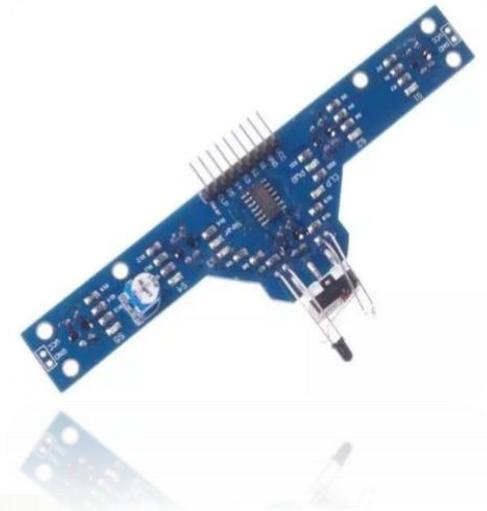


Sensores

Sensor Ultrasónico HC-SR04



Sensor seguidor de línea de 5 canales



# Selección de Componentes Electrónicos

Fuente de Alimentación

Batería LIPO 6SP1

Breaker de Encendido/Apagado

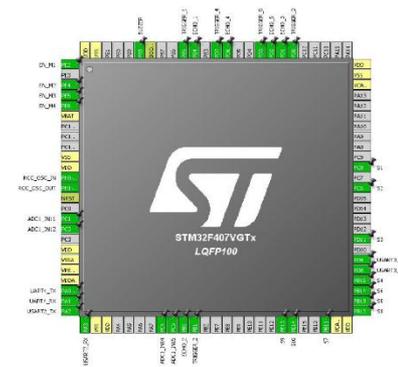
Breaker 32 A

Paro de Emergencia

Accionador

Tarjeta de Control

STM32F407  
Discovery



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## MANDO AUTÓNOMO

Piso: Cemento

Mando autónomo: Botón "Auto"

Distancia (9m)	Trayectoria 1	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
60	29,22	0,31
	28,94	0,31
	29,46	0,30
70	32,17	0,28
	31,89	0,28
	32,53	0,27
80	35,57	0,25
	35,84	0,25
	36,05	0,24



El control autónomo de la silla de ruedas permite el desplazamiento automático por distintas trayectorias definidas

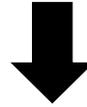


Señalética en el piso



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

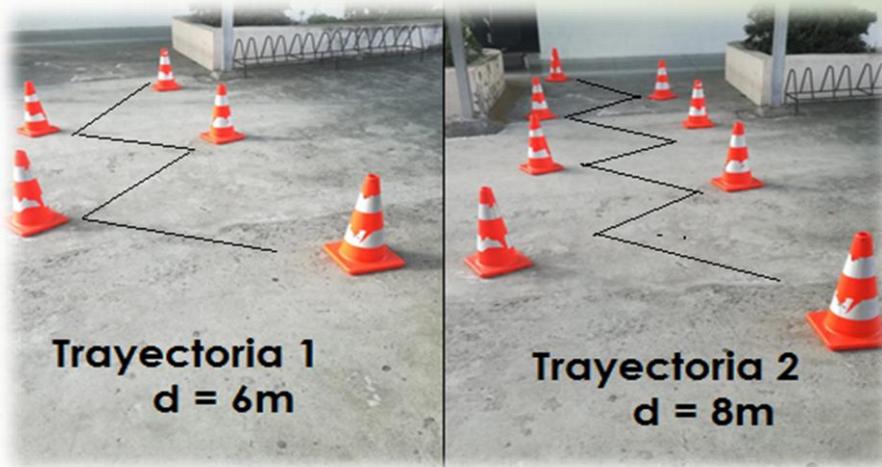
# MANDO MANUAL



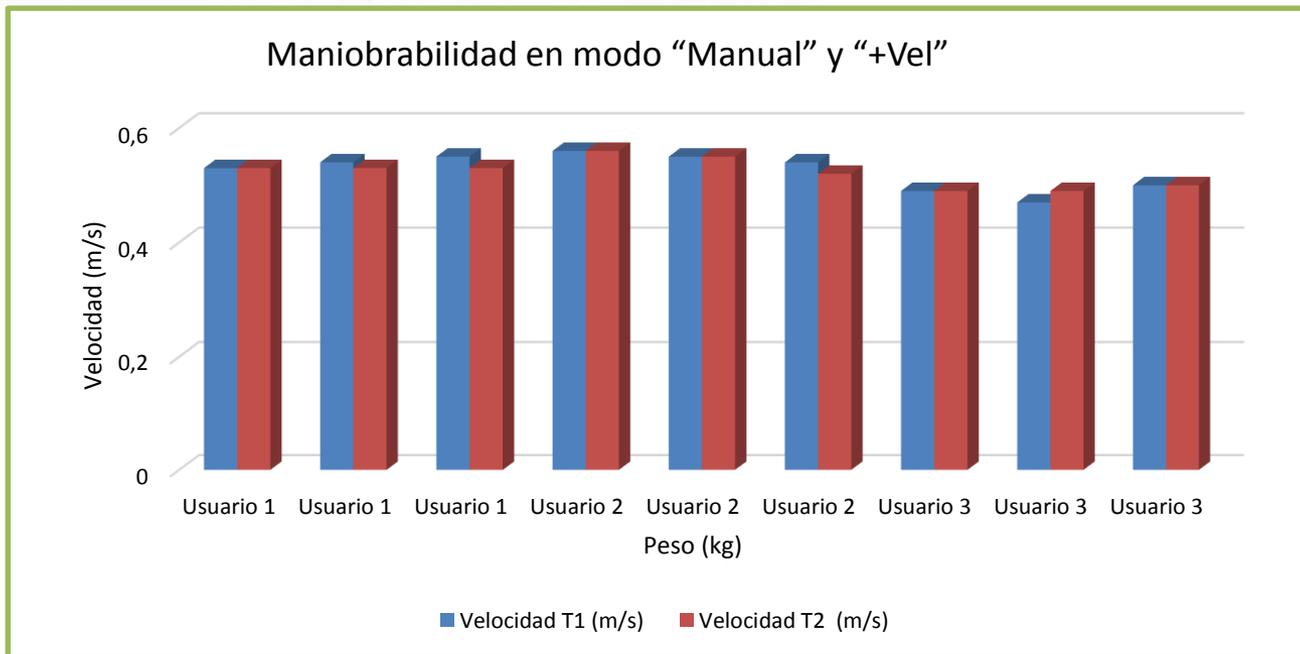
## Maniobrabilidad

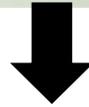
Piso: Cemento Mayor Velocidad /Botón "Manual" y "+Vel".				
Nº Usuario	Trayectoria 1: 6m		Trayectoria 2: 8m	
	Tiempo (s)	Velocidad T1 (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad T2 (m/s)
Usuario 1	11,35	0,53	15,17	0,53
	11,12	0,54	15,13	0,53
	10,92	0,55	14,98	0,53
Usuario 2	10,81	0,56	14,32	0,56
	10,97	0,55	14,64	0,55
	11,04	0,54	15,26	0,52
Usuario 3	12,15	0,49	16,23	0,49
	12,70	0,47	16,31	0,49
	11,94	0,50	15,85	0,50





El desplazamiento realizado por cada uno de los usuarios se desarrolló con efectividad, garantizando el desplazamiento de la silla omnidireccional en espacios con movilidad reducida





## Desviación de Trayectoria

DESVIACIÓN DE TRAYECTORIA (mm)						
Peso (kg)	Piso: Mármol			Piso: Cemento		
	Vertical	Horizontal	Diagonal	Vertical	Horizontal	Diagonal
60	5	23	11	13	30	18
	7	20	10	12	35	20
	3	25	15	15	28	23
	0	15	0	17	33	20
	8	18	12	12	30	15
70	11	28	17	18	42	26
	10	30	19	20	47	25
	13	27	17	18	45	30
	9	28	20	17	40	25
	11	33	16	22	51	28
80	15	45	24	25	58	55
	15	40	30	30	60	52
	18	42	28	35	65	48
	20	44	32	28	55	40
	24	53	35	35	62	45



## VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Se observa las pruebas realizadas para diferentes desplazamientos y pesos respecto a las pruebas de desviación de trayectoria, donde se toma como pruebas válidas a aquellas que no superen el margen de error de 50 mm

Nº	Desplazamiento	Peso	Funcional	No Funcional	Nº Pruebas
1	Vertical	60	10	0	10
		70	10	0	10
		80	10	0	10
2	Horizontal	60	10	0	10
		70	9	1	10
		80	5	5	10
3	Diagonal	60	10	0	10
		70	10	0	10
		80	8	2	10
		TOTAL	82	8	90



## Método Chi cuadrado

$$\lambda^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

- $O_i$  = Frecuencia absoluta observada o empírica
- $E_i$  = Frecuencia esperada
- Nivel de confianza = 95%

$$\lambda^2_{\text{calculado}} = 28,229$$

Desplazamiento	Peso	O	E	O - E	(O - E) <sup>2</sup>	$\frac{(O - E)^2}{E}$
Vertical Funcional	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	80	10	9,11	0,89	0,792	0,087
Horizontal Funcional	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	9	9,11	-0,11	0,012	0,001
	80	5	9,11	-4,11	16,892	1,854
Diagonal Funcional	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	80	8	9,11	-1,11	1,232	0,135
Vertical No Funcional	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	80	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
Horizontal No Funcional	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	1	0,89	0,11	0,012	0,013
	80	5	0,89	4,11	16,892	18,98
Diagonal No Funcional	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	80	2	0,89	1,11	1,232	1,384

- **H1 (hipótesis alternativa):** Mediante el diseño y construcción de la silla de ruedas omnidireccional con control autónomo se optimizarán los desplazamientos en ambientes con movilidad reducida.

$$\lambda^2_{calculado} \geq \lambda^2_{tabulado}$$

### Comprobación Hipótesis

$$\lambda^2_{tabulado} = 15,507 \rightarrow$$

- Nivel de Confiabilidad: 95%
- $v = (\#de\ pruebas - 1)(\#de\ opciones - 1) = 8$

$$\lambda^2_{calculado} \geq \lambda^2_{tabulado}$$

$$28,229 \geq 15,507$$

Se observa que el margen de error en la desviación de trayectoria presentada en las pruebas posee un valor mínimo que no influye en el seguimiento de trayectoria deseada por el usuario, por lo tanto, si se presenta la optimización de desplazamientos.



# CONCLUSIONES

- Mediante el estudio de la cinemática omnidireccional se determina la combinación de movimientos de las ruedas, para ejecutar los desplazamientos omnidireccionales y las ecuaciones para el cálculo de la velocidad teórica, que viene condicionada por la selección del diámetro de las ruedas mecanum y de la potencia de los motores, obteniendo un valor teórico de velocidad de 0,85 m/s.
- Por medio del estudio de la cinética de la silla de ruedas omnidireccional, se establece la potencia requerida que deben proporcionar los motores igual a 420 W , para proveer una fuerza mínima de 988,3 N necesaria para desplazamientos en rampas y superficies planas.
- La distribución del peso estudiada en la cinética de la silla de ruedas, establece que el 81% correspondiente al peso de la persona, reposa sobre la columna que une el asiento con la estructura, haciendo a este elemento el más crítico de todo el conjunto con una posible deformación de 7 mm, para cargas mayores al peso permitido de 80 kg.



- Mediante la simulación del software CAE, se obtuvo un factor de seguridad de 5,74 mayor al factor de diseño igual a 4; debido a las características que presenta el acero ASTM A36 y a las fuerzas aplicadas.
- Las dimensiones de la silla de ruedas están diseñadas de acuerdo a la Norma ISO 7176-5 y a los requerimientos del usuario, obteniendo las medidas de longitud, ancho y altura igual a 1200,700 y 1100 mm respectivamente, favoreciendo a su desplazamiento en espacios con movilidad reducida.
- La implementación del control manual permite el accionamiento de los actuadores de la silla de ruedas mediante un Joystick virtual, con una distribución de 16 partes iguales y una tolerancia de 22.5 °; donde la maniobrabilidad de la persona es un factor que no influye directamente en el desplazamiento final de la silla de ruedas.
- A través del control autónomo, la silla de ruedas cumple las funciones de seguir una trayectoria predefinida mediante una señalética en el piso, detectar obstáculos y detener el desplazamiento de la silla de ruedas, indicando la detección mediante una alarma para la posterior evasión del obstáculo por el usuario.



# RECOMENDACIONES

- Implementar ruedas omnidireccionales mecanum con capacidad de carga superior a 150 kg para incrementar el peso admisible del usuario.
- Optimizar el espacio dentro de la estructura para implementar el sistema de transmisión en conjunto con el sistema electrónico.
- Implementar un sistema de transmisión que permita aumentar el torque de los motores con objetivo de mejorar el desempeño de la silla de ruedas en rampas con pendientes superior al 12% (7grados).
- Implementar un número mayor de sensores de proximidad en cada lado de la silla de ruedas omnidireccional, con el propósito de detectar obstáculos en cualquier dirección.
- Integrar nuevos sensores con características inteligentes que permitan realizar desplazamiento sin necesidad de una trayectoria señalizada.



*¡Gracias!*



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