



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD
DE INGENIERÍA

Mendoza - Argentina

ROBOT ASISTENTE DE COSECHA

PROYECTO INTEGRADOR

Cátedra: Robótica II
Carrera: Ingeniería en Mecatrónica

Profesor adjunto a cargo: Roberto Haarth. Ingeniero Industrial.
Doctorado en Formación. UNCuyo

Autores:
Cantú Tsallis, Maximiliano-11294 y Lage Tejo, Joaquín-11495
Estudiantes del último año de de la carrera Ingeniería en Mecatrónica,
Facultad de Ingeniería, UNCuyo

Septiembre 2023

Índice

1. Resumen	2
2. Palabras clave	2
3. Introducción	2
4. Objetivos	3
5. Metodología	3
5.1. Modelo Cinemático	3
5.2. Modelo Dinámico	7
5.3. Trayectorias y Simulación Dinámica	9
5.3.1. Planificación de Trayectorias	9
5.3.2. Simulación Dinámica a Lazo Abierto	10
5.4. Selección de Actuadores y Sensores	11
5.4.1. Actuadores	11
5.4.2. Sensores	13
5.5. Simulación de Modos de operación	17
5.5.1. Simulación modo seguidor de operario	18
5.5.2. Simulación modo autónomo	18
5.6. Cronograma de Actividades	19
5.7. Costos de Fabricación	19
6. Resultados	20
7. Discusión	20
8. Conclusiones	20
9. Bibliografía	22

1. Resumen

Proyecto realizado en el año 2022 en el cual se describe el desarrollo de un robot móvil colaborativo de cosecha, del tipo terrestre diferencial de oruga. Se determina su forma y estructura geométrica y, se dimensiona acorde a la tarea a desarrollar y la carga a trasladar. A continuación, se desarrollan los modelos cinemático y dinámico, derivando las ecuaciones correspondientes. De acuerdo a lo obtenido, se seleccionan los actuadores adecuados para realizar los esfuerzos debidos según la tarea a efectuar, así como los sensores necesarios para la misma. En este caso se consideran, además de los inherentes a la dinámica del robot, aquellos que permitirán realizar las funciones de posicionamiento local y global, y los necesarios para la funcionalidad de báscula del robot. Definida la totalidad de las características del robot, se simula el mismo para evaluar su desempeño, y finalmente se evalúa la viabilidad del proyecto completo considerando su costo en materiales y horas hombre.

2. Palabras clave

Robótica móvil, Modelo dinámico, Control de trayectoria, Asistente de cosecha.

3. Introducción

Se detalla la investigación realizada para implementar un robot móvil terrestre de orugas con tracción diferencial, debido a que su aplicación sería principalmente en terrenos irregulares y a la intemperie, sumado a las variaciones que el tiempo realiza sobre la superficie de movimiento del robot. Además, el terreno puede presentar pendientes, zonas de alto agarre y zonas dónde el robot posiblemente “patine” o pierda pasos en su referencia. Debe ser capaz de cargar cajones de uvas de hasta 25kg. El robot debe ser capaz de avanzar, retroceder, girar en movimiento, así como también girar sobre su posición.

Su funcionamiento en el proceso de cosecha se basa en seguir al operario, tarea que se realizará gracias a una comunicación inalámbrica a través de sistemas de radiofrecuencia entre el robot y una tobillera o elemento similar portado por el operario. Cuando este lo defina, o si así se lo demanda a través del control supervisor de toda la viña, el robot volverá de forma autónoma a la base o centro de recolección.

El sistema de navegación autónoma que implementa para posicionarse y trasladarse por las parcelas, consistirá de un modelo redundante constituido por elementos de tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global), tecnología LPS (Sistema de Posicionamiento Local) empleando balizas de señalización de corto alcance de visión directa. Para asegurar la correcta navegación del robot, y evitar que este colisione con las plantas de vid encontradas en la parcela, se agregará un sistema redundante de visión artificial que permitirá detectar el camino a seguir, corrigiendo la posición del robot en tiempo real, eliminando posibles errores debido a pérdida de paso en los sensores por irregularidades en el terreno o resbalamientos de las orugas.

Por último, el robot posee un sistema de báscula que le permite determinar el peso total que está cargando, con lo cual puede alertar al operario cuando se alcanza el peso determinado por cajón. Este se emplea a través de un transductor de presión (celda de carga) colocado debajo del soporte del cajón.

4. Objetivos

- Diseñar y dimensionar la estructura física y la geometría real del robot colaborativo de cosecha.
- Estudiar el modelo cinemático del robot y obtener sus ecuaciones características.
- Estudiar el modelo dinámico y obtener sus ecuaciones características.
- Simular la respuesta del robot ante consignas a lazo abierto para corroborar los desarrollos previos.
- Seleccionar los actuadores y sensores acordes a los desarrollos previos y a la aplicación elegida.
- Definir los sistemas de posicionamiento y navegación local y global.

5. Metodología

5.1. Modelo Cinemático

Se procede a realizar el análisis y cálculo cinemático de un robot móvil diferencial, el cual tiene 2 ruedas conductoras colocadas en el eje perpendicular a la dirección del movimiento del robot, es decir, 2 motores conductores. Cada rueda será controlada de manera independiente una de la otra, permitiéndole al robot realizar giros hacia un lado o hacia el otro, dependiendo de la diferencia en las velocidades angulares de cada una de las ruedas.

La cinemática de un robot móvil describe la evolución de la posición/orientación del mismo en función de las variables de actuación, y para calcularla se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- No hay deslizamiento entre las ruedas y el suelo.
- Se considera al robot como un sólido rígido, es decir, no sufre flexión.

Para realizar los cálculos, se toma al punto dado por la intersección entre el eje longitudinal del robot y el eje de las ruedas como punto de control, el cual se encuentra a una distancia de $\frac{L}{2}$ de cada una de las ruedas. Como se puede ver en la figura 1, los parámetros del robot diferencial son los siguientes:

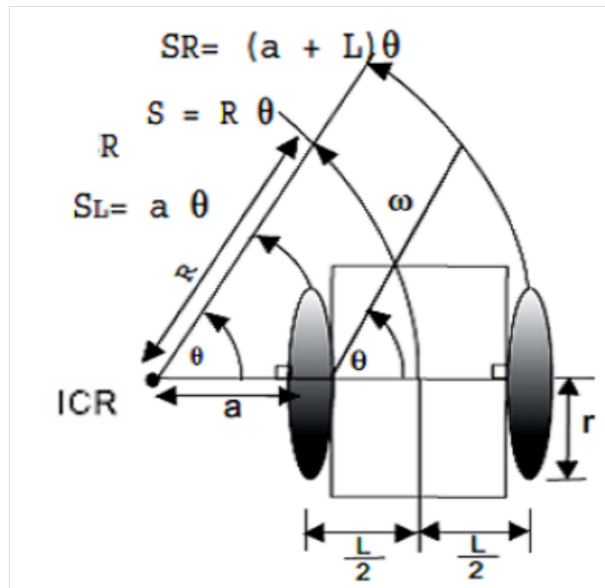


Figura 1: Configuración Cinemática. Fuente: Sanguino, De Jesus, 2014

- ICR: Centro Instantáneo de Rotación.
- R: Radio de giro.
- L: Distancia entre las ruedas.
- a: Distancia entre el ICR y la rueda más cercana.
- v_L : Velocidad lineal rueda izquierda.
- v_R : Velocidad lineal rueda derecha.
- r: Radio de las ruedas.
- ω_L : Velocidad angular rueda izquierda.
- ω_R : Velocidad angular rueda derecha.

La velocidad lineal de cada una de las ruedas está dada por:

$$v_L = r \cdot \omega_L \quad ; \quad v_R = r \cdot \omega_R \quad (5.1)$$

La distancia recorrida por la rueda izquierda es S_L , por la rueda derecha es S_R y por el robot referenciado al punto de control es S; y están dadas por:

$$S_L = a \cdot \theta \quad (5.2)$$

$$S_R = (a + L) \cdot \theta \quad (5.3)$$

$$S = R \cdot \theta \quad (5.4)$$

Operando en 5.3 y por 5.2 se obtiene:

$$S_R = a \cdot \theta + L \cdot \theta$$

$$S_R = S_L + L \cdot \theta \quad (5.5)$$

Derivando 5.5 respecto al tiempo para obtener la velocidad angular:

$$\begin{aligned}\dot{S}_R &= \dot{S}_L + L.\dot{\theta} \\ v_R &= v_L + L.\omega \\ \omega &= \frac{v_R - v_L}{L}\end{aligned}\tag{5.6}$$

Sumando las distancias recorridas 5.2 y 5.3; y sabiendo que $R = a + \frac{L}{2}$, se obtiene:

$$S_R + S_L = a\theta + (a + L)\theta = 2a\theta + L\theta = 2\theta \left(a + \frac{L}{2} \right) = 2\theta R$$

Por 5.4:

$$\begin{aligned}S_R + S_L &= 2S \\ S &= \frac{S_R + S_L}{2}\end{aligned}\tag{5.7}$$

Derivando 5.7 respecto al tiempo para obtener la velocidad lineal del puntos de control del robot:

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \frac{\dot{S}_R + \dot{S}_L}{2} \\ v &= \frac{v_R + v_L}{2}\end{aligned}\tag{5.8}$$

Sabiendo que, en términos generales, $v = \omega * r$; se puede calcular el radio de curvatura 'R' con 5.6 y 5.8:

$$\begin{aligned}R &= \frac{v}{\omega} = \frac{\frac{(v_R + v_L)}{2}}{\frac{(v_R - v_L)}{L}} \\ R &= \frac{L (v_R + v_L)}{2 (v_R - v_L)}\end{aligned}\tag{5.9}$$

Analizando 5.9, se concluye lo siguiente:

- Si $v_R = v_L \Rightarrow R = \infty \rightarrow$ El ICR se encuentra en el infinito, el robot se moverá en línea recta.
- Si $v_R = -v_L \Rightarrow R = 0 \rightarrow$ El ICR se encuentra en el punto de control, el robot girará sobre su propio centro.
- Si $v_R \neq v_L \Rightarrow R = x \rightarrow$ El ICR se encuentra a una distancia 'x' del punto de control ($x \neq 0$), el robot girará para un sentido o para el otro.

Habiendo establecido la relación entre las velocidades lineales y angulares de las ruedas y del robot, su respuesta respecto a un punto de control y conocer la distancia a la que se encuentra de su ICR; se procede a analizar la cinemática respecto a un sistema de referencia desplazado respecto al eje de giro de cada rueda.

En la figura 2 se puede observar que el punto de control se encuentra en el punto (x_h, y_h) y el robot se orienta un ángulo θ respecto a la horizontal. Se aclara, entonces, que el eje motriz del robot (aquel que pasa por el eje de ambas ruedas motrices, una de cada lado del robot y en su respectiva oruga) se encuentra en la parte trasera del mismo. Entiéndase por "trasera."aquella que no posee los botones para que el usuario (cosechador)

interactúe, dado que desde un punto de vista constructivo no posee parte delantera ni trasera.

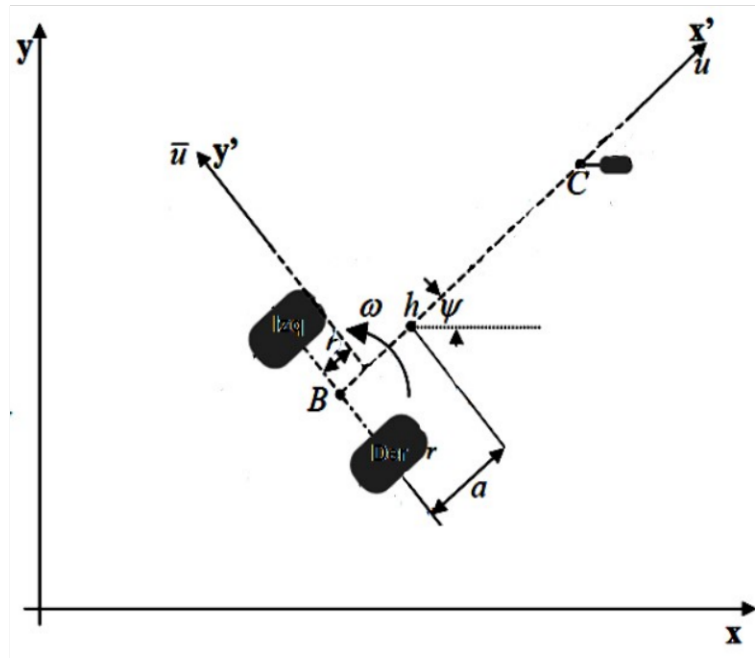


Figura 2: Punto de Control Desplazado. Fuente: Sanguino, De Jesus, 2014

Siendo (x_B, y_B) las coordenadas del punto medio entre las 2 ruedas (B), 'a' la distancia entre el punto B y el punto de control (h), se buscan calcular las velocidades (\dot{x}, \dot{y}) del robot respecto al sistema de referencia fijo:

$$x_h = x_B + a \cos(\theta) \quad (5.10)$$

$$y_h = y_B + a \sin(\theta) \quad (5.11)$$

Derivando 5.10 y 5.11:

$$\dot{x}_h = \dot{x}_B - a \sin(\theta)\dot{\theta} \quad (5.12)$$

$$\dot{y}_h = \dot{y}_B + a \cos(\theta)\dot{\theta} \quad (5.13)$$

Sabiendo que:

$$\dot{x}_B = v \cos(\theta) \quad (5.14)$$

$$\dot{y}_B = v \sin(\theta) \quad (5.15)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (5.16)$$

Siendo $v = \omega R$, obtenemos las ecuaciones cinemáticas del robot, con su punto de control fuera el eje de las ruedas:

$$\dot{x} = v \cos(\theta) - a \sin(\theta)\dot{\theta} \quad (5.17)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) + a \cos(\theta)\dot{\theta} \quad (5.18)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (5.19)$$

Donde, según 5.6 y 5.8, las velocidades v y ω , son:

$$v = \frac{(v_R + v_L)}{2} \quad ; \quad \omega = \frac{(v_R - v_L)}{L}$$

Matricialmente queda:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -a \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & a \cos(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

5.2. Modelo Dinámico

La dinámica considera la evolución de la posición, velocidad y aceleración del robot en respuesta a los pares de actuación de las ruedas; y, se considera como punto de partida la dinámica del vehículo obtenida con la formulación de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q \quad (5.21)$$

Donde:

- q : vector de coordenadas generalizadas
- Q : vector de fuerzas generalizadas
- T : energía cinética del sistema

Cabe aclarar que no se tiene en cuenta la energía potencial, es decir, los pares gravitacionales, debido a que se supone que el vehículo se desplaza por una superficie plana, horizontal y sin variación de altura respecto al suelo. Luego, se realizará una corrección debida a las variaciones de pendiente del terreno, para tener en cuenta este fenómeno en el dimensionamiento dinámico del robot.

Por otro lado, la energía cinética (T) considera la suma de la energía cinética del cuerpo del robot (T_{robot}) y las energías de cada rueda (T_{r_i}).

El modelo dinámico genérico del robot móvil terrestre de orugas, va a depender de las orugas seleccionadas que, en este caso, cada una de ellas cuenta con 4 ruedas pequeñas y 2 ruedas grandes. Por lo tanto, se plantea lo siguiente:

$$T = T_{\text{robot}} + T_{r_{\text{izq}}} + T_{r_{\text{der}}} \quad (5.22)$$

$$T_{\text{robot}} = \frac{1}{2} M v^2 + \frac{1}{2} I_T \omega^2 + M v \omega a \quad (5.23)$$

$$T_{r_{\text{der}}} = 4 \left[\frac{m_c}{2} r_c^2 \dot{\theta}_{cR}^2 \right] + 2 \left[\frac{m_g}{2} r_g^2 \dot{\theta}_{gR}^2 \right] \quad (5.24)$$

$$T_{r_{\text{izq}}} = 4 \left[\frac{m_c}{2} r_c^2 \dot{\theta}_{cL}^2 \right] + 2 \left[\frac{m_g}{2} r_g^2 \dot{\theta}_{gL}^2 \right] \quad (5.25)$$

Donde:

- M : masa total
- a : distancia del centro de masa al punto de control
- m_g : masa rueda grande
- m_c : masa rueda chica

- r_g : radio rueda grande
- r_c : radio rueda chica

Se calculan los cuadrados de las velocidades:

$$\dot{\theta}^2 = \frac{r_g^2}{L^2} (\dot{\theta}_{gR}^2 - 2\dot{\theta}_{gR}\dot{\theta}_{gL} + \dot{\theta}_{gL}^2) \quad (5.26)$$

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = a^2\dot{\theta}^2 + \frac{r_g^2}{4} (\dot{\theta}_{gR}^2 + 2\dot{\theta}_{gR}\dot{\theta}_{gL} + \dot{\theta}_{gL}^2) \quad (5.27)$$

Reemplazando 5.26, 5.27, 5.6 y 5.8 en 5.22:

$$\begin{aligned} T = & \frac{M}{2} r_g^2 \left[\frac{a^2}{L^2} (\dot{\theta}_{gR}^2 - 2\dot{\theta}_{gR}\dot{\theta}_{gL} + \dot{\theta}_{gL}^2) + \frac{1}{4} (\dot{\theta}_{gR}^2 + 2\dot{\theta}_{gR}\dot{\theta}_{gL} + \dot{\theta}_{gL}^2) \right] + \\ & \frac{I_t r_g^2}{2L^2} (\dot{\theta}_{gR}^2 - 2\dot{\theta}_{gR}\dot{\theta}_{gL} + \dot{\theta}_{gL}^2) + \frac{M r_g^2 a}{2L} (\dot{\theta}_{gR}^2 - \dot{\theta}_{gL}^2) + T_{rizq} + T_{rder} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que $\dot{\theta}_c = \frac{r_g}{r_c} \dot{\theta}_g$ es la relación entre las ruedas; y que a partir de ahora $\theta_{gR} = \theta_R$, $\theta_{gL} = \theta_L$ y $r_g = r$:

$$\begin{aligned} T = & \frac{M r^2}{2} \left[\frac{a^2}{L^2} (\dot{\theta}_R^2 - 2\dot{\theta}_R\dot{\theta}_L + \dot{\theta}_L^2) + \frac{1}{4} (\dot{\theta}_R^2 + 2\dot{\theta}_R\dot{\theta}_L + \dot{\theta}_L^2) \right] + \\ & \frac{I_t r^2}{2L^2} (\dot{\theta}_R^2 - 2\dot{\theta}_R\dot{\theta}_L + \dot{\theta}_L^2) + \frac{M r^2 a}{2L} (\dot{\theta}_R^2 - \dot{\theta}_L^2) + \\ & 4 \left[\frac{m_c}{2} \dot{\theta}_R^2 r^2 \right] + 2 \left[\frac{m_g r^2}{2} \dot{\theta}_R^2 \right] + 4 \left[\frac{m_c}{2} \dot{\theta}_L^2 r^2 \right] + 2 \left[\frac{m_g r^2}{2} \dot{\theta}_L^2 \right] \end{aligned}$$

Aplicando derivada parcial de T respecto $\dot{\theta}_R$ y $\dot{\theta}_L$; y derivando respecto al tiempo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_R} \right) = \frac{r^2}{2} \left[M a^2 (\ddot{\theta}_R - \ddot{\theta}_L) + \frac{1}{4} (\ddot{\theta}_R + \ddot{\theta}_L) + I (\ddot{\theta}_R - \ddot{\theta}_L) + \frac{M a L}{r} \ddot{\theta}_R + (2m_c \ddot{\theta}_R + m_g \ddot{\theta}_R) 2L^2 \right]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} \right) = \frac{r^2}{2} \left[M a^2 (-\ddot{\theta}_R + \ddot{\theta}_L) + \frac{1}{4} (\ddot{\theta}_R + \ddot{\theta}_L) + I (\ddot{\theta}_R + \ddot{\theta}_L) - \frac{M a L}{r} \ddot{\theta}_L + (2m_c \ddot{\theta}_L + m_g \ddot{\theta}_L) 2L^2 \right]$$

La expresión matricial queda:

$$\begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} = \frac{r^2}{L^2} \begin{bmatrix} M a^2 + \frac{1}{4} + I + \frac{M a L}{r} + 2L^2(2m_c + m_g) & -M a^2 + \frac{1}{4} - I \\ -M a^2 + \frac{1}{4} - I & M a^2 + \frac{1}{4} + I - \frac{M a L}{r} + 2L^2(2m_c + m_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_R \\ \ddot{\theta}_L \end{bmatrix}$$

Se considera un Torque de fricción del 30% del ideal obtenido en las simulaciones, para considerar posibles efectos de resbalamiento de las orugas en terrenos de muy bajo agarre. Así mismo, agregamos un Torque de pendiente para tener en cuenta los cambios de elevación del terreno de trabajo (se asume 30°). De esta forma queda:

$$\begin{aligned} \tau_{friccion} &= 0,3 \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} \\ \tau_{pendiente} &= \frac{r}{2} M g \sin(\alpha) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} ; \quad \alpha = 30\% \end{aligned}$$

Se obtiene que el cálculo del torque total τ es:

$$\tau_{Total} = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} + \tau_{friccion} + \tau_{pendiente} \quad (5.28)$$

5.3. Trayectorias y Simulación Dinámica

5.3.1. Planificación de Trayectorias

Para estimar el trabajo realizado por el Robot, se supone una trayectoria acorde a su tarea, en la que debe recorrer las hileras y volver al centro de recolección. Previo a generar la trayectoria se confeccionó un mapa del terreno en el cuál se movería el robot, simulando las hileras de vid con color verde y con color marrón las zonas por las que el robot puede desplazarse, es decir, la tierra. En la figura 3 se puede observar dicho mapa con los puntos de inicio y fin que el robot deberá satisfacer en su modo autónomo.



Figura 3: Mapa del terreno simulado. Fuente propia

Teniendo el mapa del terreno, se genera la siguiente trayectoria utilizando el software de simulación MatLab, dónde se añadió una inclinación a la zona de tarea para sumar torque en ambas articulaciones y lograr una situación más genérica y desfavorable.

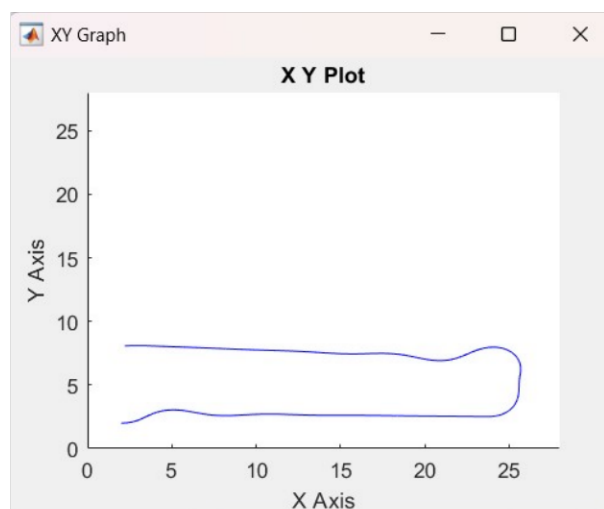


Figura 4: Trayectoria Simulada. Fuente propia

5.3.2. Simulación Dinámica a Lazo Abierto

Para realizar una simulación inicial, con el fin de obtener los valores de torque necesarios en cada articulación se deben definir los siguientes parámetros del robot, referentes a su comportamiento dinámico:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR
M	Masa total	90kg
L	Separación entre ruedas	55cm
Mg	Masa de la rueda grande	1,5kg
mc	Masa de la rueda chica	1kg
Dg	Diámetro de la rueda grande	25cm
dc	Diámetro de la rueda chica	16cm
a	Distancia al punto de control	44,5cm
I_T	Inercia total	8,53kg.m ²
α	Pendiente máx. del suelo	30°

Tabla 1: Parámetros del robot móvil. Fuente propia

Para completar la tabla anterior, se considera un peso total del robot de 30kg, una carga de 25kg más un número conservador de sobrecarga de 10kg (contemplando lluvias que podrían llenar el canasto con hasta 10L de agua, u otros). Además, se considera al robot como un prisma de cara cuadrada (80 cm de lado), que rota sobre su eje, para el cálculo de su inercia total. La masa de las orugas se obtiene del fabricante y es de 17,5kg. Con todo esto, se define el peso total en 90kg.

Habiendo definido la trayectoria y los parámetros del robot, se realiza la simulación en el software de trabajo Simulink, obteniéndose las siguientes respuestas:

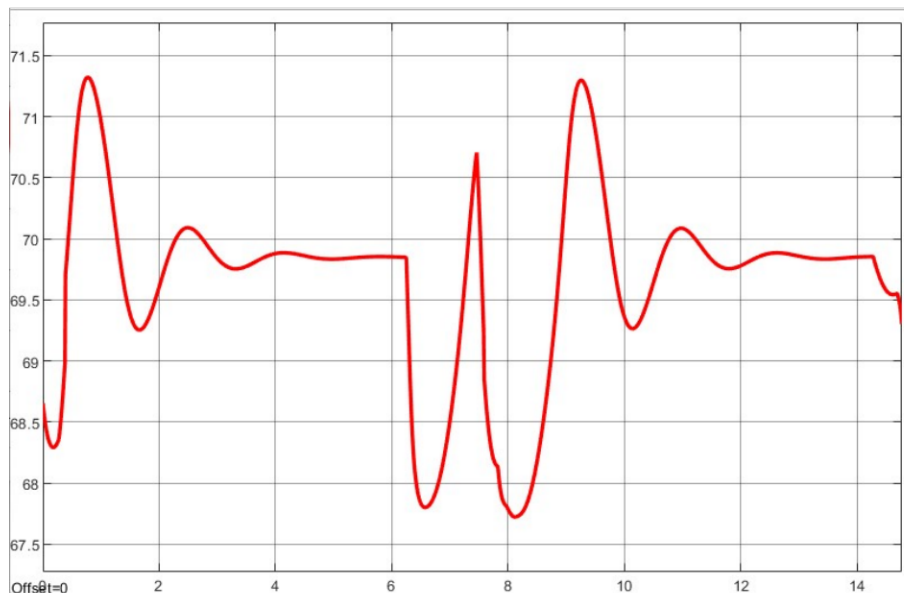


Figura 5: Torque Simulado Rueda Izquierda. Fuente propia

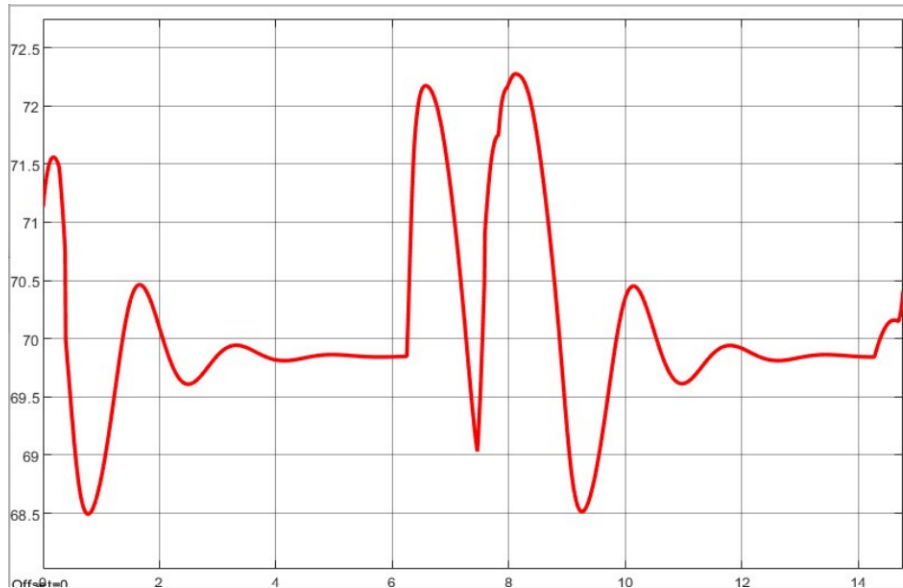


Figura 6: Torque Simulado Rueda Derecha. Fuente propia

Para el cálculo del torque total se tiene en cuenta, de acuerdo a la literatura, la pérdida de velocidad por deslizamiento de las ruedas ronda el 30 %, por lo qué, de forma conservativa, se suma un 30 % al torque calculado como teórico, en forma de Torque de Fricción o Deslizamiento (como se mencionó en el apartado anterior). Cabe aclarar que las simulaciones se presentan ya incluyendo dicho torque de fricción, y el mencionado torque de inclinación del terreno.

- Torque Teórico en cada articulación: 35Nm
- Torque debido a los efectos Gravitacionales: 27Nm
- Torque de Deslizamiento y Fricción (se considera un 30 %): 10,5Nm

Torque total = 72,5Nm

5.4. Selección de Actuadores y Sensores

5.4.1. Actuadores

Motor Brushless DC

De acuerdo al Torque calculado, asumiendo una velocidad máxima de $3\frac{m}{s}$ que equivalen a $20\frac{rad}{s}$ y tomando como base una velocidad nominal de 3000rpm, se calcula el torque de motor necesario (T_e), y así poder seleccionar los actuadores.


$$i = \frac{n_s}{n_3} = \frac{20\frac{rad}{s}}{3000rpm \left(\frac{\pi}{30}\right)} = 0,064 \quad (5.29)$$

$$T_e = T_s \cdot i = 4,64N.m \quad (5.30)$$

Teniendo en cuenta lo calculado en 5.30 y los parámetros indicado en la Tabla 1, se selecciona el siguiente motor sin escobillas de corriente continua brushless:

ROYTEK 130BSA155|030X-01

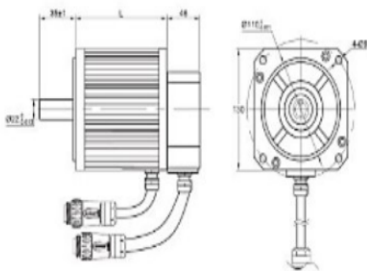
Brushless DC Motors 无刷直流电机
130BSA Series



General Specification

Winding type 绕组连接方式	YWE
Hall effect angle 霍尔分布角度	120 Deg. Electrical angle
Radial play 径向间隙	0.02mm @460g
End play 轴向间隙	0.08mm @450g
Max. radial force 径向最大承受力	220N @ 20mm from the flange
Max. axial force 轴向最大承受力	60N
Insulation class 绝缘等级	B
Dielectric strength 介电强度	500VDC for one minute
Insulation resistance 绝缘电阻	100MΩ min., 500VDC

Dimensions in mm



Performance Data

Model 型号	Units	130BSA120D030X-01	130BSA155 030X-01
Number of poles 极数		4	
Number of phase 相数		3	
Rated voltage 额定电压	VDC	48	310
Rated speed 额定转速	RPM	3000	3000
Continuous stall torque 持续堵转转矩	N.m	2.8	5.5
Rated torque 额定转矩	N.m	2.5	5
Rated power 额定功率	W	785	1570
Peak torque 峰值转矩	N.m	7.5	15
Peak current 峰值电流	A	70	21.7
Torque constant 转矩常数	Nm/A	0.012	0.077
Back E.M.F 反电势	V/KRPM	8.93	8.93
Rotor inertia 转动惯量	g.cm ²	2.4	4.8
Body length 电机长度	mm	120	155
Voltage range 电压范围	VDC		48 ~ 310
Speed Range 转速范围	RPM		1000 ~ 3000
Weight 重量	Kg	5	7

ROYTEK X MOTION TECHNOLOGIES 21

Figura 7: Catálogo de 3X MOTION TECHNOLOGIES

Caja Reductora Planetaria

Po otro lado, se seleccionó una caja reductora planetaria con engranajes helicoidales, por ser más compacta. Teniendo en cuenta una relación de transmisión de 16 (15.71), se seleccionó específicamente el modelo, cuyo rendimiento a par nominal es del 95 %:

SPITKOOM PA P222 0160

P222 (T2Bmax=22 Nm)												
Modelo	I _{ges}	n _{1MAX}		MW _φ	J ₁	G	Δφ2	C ₂	L _{PA}	T _{2N}	T _{2B}	T _{2NOT}
		DB _{ME}	ZB _{ME}									
		[min ⁻¹]	[min ⁻¹]									
P222_0160	16	4500	8000	≤9	0,105	3,0	8	1,8	61	16	22	44
P222_0160	16	4500	8000	>9 ≤11	0,117	3,0	8	1,8	61	16	22	44
P222_0160	16	4500	8000	>11 ≤14	0,138	3,0	8	1,8	61	16	22	44

Figura 8: Catálogo de SPITKOOM

Para verificar los cálculos, comenzamos desde el Motor entregando 5,5N.m a una eficiencia estimada del 90 %, a 3000rpm; luego la relación de transmisión de la caja reductora (16) y su eficiencia (95 %):

$$T_{\text{salida}} = \frac{5,5\text{Nm} * 3000\text{rpm} * \frac{2\pi}{60} * 0,9}{20 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} * 0,95 = 73,87\text{Nm} \quad (5.31)$$

Esto comprueba satisfactoriamente los cálculos de dimensionamiento y la selección de los elementos del Robot.

Sistema de Orugas

Por último se seleccionaron los sistemas de orugas que se utilizarán en el robot. Dichos sistemas cuentan con una disposición lineal, cuentan con la rueda motriz en la parte trasera y son de longitud modificable según la necesidad. Se seleccionó la oruga DP-PY-148 de la empresa Shanghai Puyi Industrial Co. Ltd.

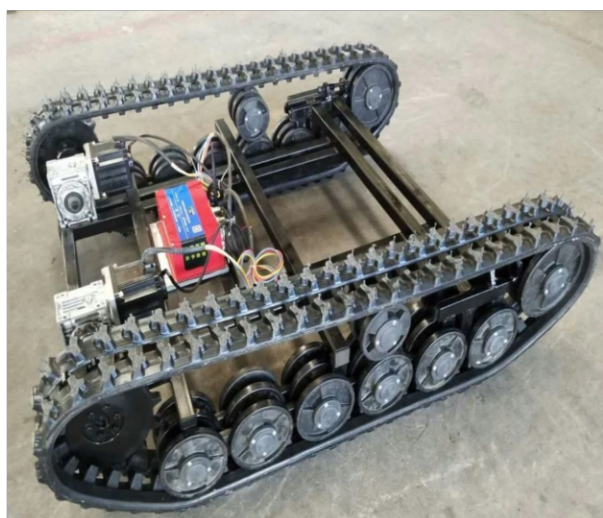


Figura 9: Orugas de SHANGAI PUYI INDUSTRIAL

Longitud	El ancho	Altura	Fuera del suelo	El ancho de vía	El peso	Rodamiento de carga	La velocidad
1500mm	1200mm	400mm	180mm	148mm	17.50kg.		-----

Figura 10: Parámetros orugas

5.4.2. Sensores

La selección de los sensores que el robot utilizará para orientarse en su entorno, está pensada desde un punto de vista de la funcionalidad de los mismos aplicadas al proyecto en cuestión, pero no se desarrollan su implementación específica ya que escapa al objetivo del presente trabajo. Se detalla que todos los sensores mencionados a continuación cuentan con un grado de protección IP67 conforme la norma IEC 60529.

Odometría y Dinámica

Con el objeto de medir la velocidad de las ruedas del robot, así como sus aceleraciones en los 3 ejes de movimiento (considerando aumentos en Z debidas a las pendientes e irregularidades del terreno), se seleccionan los siguientes productos:

- Encoder Briter BRT38-ROM16384-RT1 absoluto con una resolución de 15bits.



Figura 11: Encoder absoluto de 15 bits de BRITER ENCODER.

- Acelerómetro triaxial de alta precisión WIT HWT905



Figura 12: Acelerómetro triaxial de WIT MOTION

Posición Relativa al Entorno

Por otro lado, el robot debe ser capaz de sensor su entorno, tanto sea para evitar obstáculos, como para no perder referencia del camino que sigue en modo autónomo. Para ello se seleccionan:

- Sensor ultrasónico Schneider Electric XX630A1KAM12 con distancia de 1m regulable o no regulable con pulsador de aprendizaje.



Figura 13: Sensor ultrasónico de SCHNEIDER ELECTRIC

- Cámara Basler Ace acA720-290gc, que detecta 291 cuadros por segundo a color. Esto alimentará un sistema de Visión Artificial que le permitirá al robot observar su entorno en tiempo real.



Figura 14: Cámara acA720-290gc de BASLER

Posicionamiento Global y Local

Para esta sección, se emplean dos elementos ya que es de interés conocer la posición, tanto global, como local del robot en todo momento, en caso que alguna de ambas no funcione, con lo cuál tenemos un sistema redundante de posicionamiento absoluto, que junto a los sensores mencionados previamente, constituyen el sistema total de navegación del robot. Para esta tarea de posicionamiento, se eligen:

- Módulo GPS tipo GNSS multifrecuencia TOPGNSS TOP682-6043 de alta precisión, con entrada de antena dual.



Figura 15: Sensor de posicionamiento global(GPS) de TOPGNSS

- Módulo LPS Starter Set Super-MP-3D que funciona mediante la detección de balizas lo cual permite una localización local y un sistema de navegación de alta precisión.



Figura 16: Sensor de posicionamiento local(LPS) de MARVELMIND ROBOTICS

Sistema de Báscula

Con el fin de detectar cuándo se han cargado 25kg de uvas en el cajón (considerando un margen para tierra, ramas, etc.), se debe seleccionar un dispositivo capaz de traducir el peso apoyado sobre el robot, en una señal medible por el mismo. Para ello se selecciona:

- Celda de carga de punto único Siwarex WL 260 Load Cell SP-S AA, con rango de 3kg a 100 kg.



Figura 17: Celda de carga Siwarex WL 260 de RS

5.5. Simulación de Modos de operación

Para realizar una representación más similar a la aplicación real, se optó por dividir el funcionamiento en dos modos de operación:

- Simulación modo seguidor de operario.
- Simulación modo autónomo.

Ambas simulaciones se implementaron en el software 'Webots', el cuál permite realizar simulaciones de robots móviles de diferentes tipos. En este caso, es un robot terrestre de orugas. Además, permite crear un entorno o 'mundo' en el que se encuentra y se desplazará el robot.

Se modeló el robot de la figura 18 utilizando las herramientas que el software provee, de dimensiones similares a las mencionadas en la descripción y con un sistema de orugas similares a las seleccionadas. El entorno de la figura 19 se diseñó con la intención de realizar una representación lo más parecida posible a un campo o finca real, aplicando terreno irregular con desniveles e imperfecciones. Las hileras de vid se simularon con pequeños árboles ordenados en fila, uno al lado del otro, ya que el software no cuenta con hileras reales.

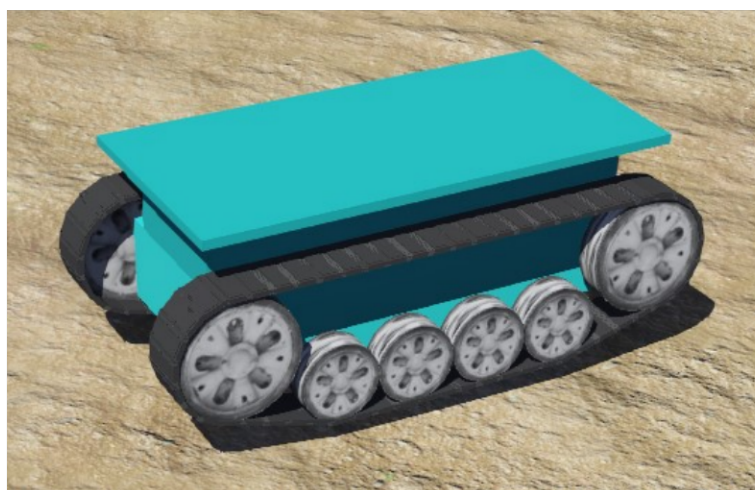


Figura 18: Robot simulación. Fuente: simulador Webots con licencia educativa



Figura 19: Hileras de vid simulación. Fuente: simulador Webots con licencia educativa

5.5.1. Simulación modo seguidor de operario

Simula la función de seguir al operario continuamente durante el proceso de cosecha, manteniendo una distancia al mismo; realizando movimiento de avance, retroceso y giro a ambos lados. Para lograrla se aplicó un control mediante las flechas del teclado, de esta forma, el movimiento del robot depende de un usuario que acciona las teclas para controlarlo. Esto se debe a que, como se mencionó previamente, el robot sigue a un operario para trasladar el cajón de uvas y así evitarla la carga y descarga constante del mismo mientras realiza la cosecha.

5.5.2. Simulación modo autónomo

En la simulación del modo autónomo, el robot simula el desplazamiento que realizaría cuando el cajón de uvas esté lleno y deba trasladarlo por su cuenta, mediante el uso de los sensores, hasta un punto de descarga específico. Para lograrla, se aplica un controlador con la trayectoria utilizada en la simulación dinámica, mostrada previamente.



Figura 20: Mundo de simulación. Fuente: simulador Webots con licencia educativa

5.6. Cronograma de Actividades

Actividades	Tiempo en Semanas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Plantear Objetivos del Proyecto	○														
Diseñar y dimensionar la estructura física y la geometría		○													
Estudiar el modelo cinemático			○	○											
Estudiar el modelo dinámico					○	○									
Seleccionar actuadores y sensores						○	○								
Implementar sistemas de posicionamiento local y global								○	○	○	○				
Diseñar el modelo de control											○	○	○	○	
Simular respuesta a lazo cerrado														○	○
Costos															○

Figura 21: Cronograma de Actividades

5.7. Costos de Fabricación

En el siguiente cuadro, se observa el presupuesto estimado para la construcción efectiva del robot. Se tuvieron en cuenta los datos y costos expresados por los fabricantes (en todo elemento que fue posible), y se estimaron otros de acuerdo a investigaciones de mercado (como la electrónica y control, y la estructura mecánica).

COSTOS			
Producto	Cantidad	Precio unitario	Precio
Motor DC Brushless 3X Motion 130BSA	2	US\$ 580,00	US\$ 1.160,00
Caja Reductora Spitkoom	2	US\$ 1.400,00	US\$ 2.800,00
Orugas DP-PY-148	2	US\$ 1.150,00	US\$ 2.300,00
Encoder Briter BRT38-ROM16384-RT1	2	US\$ 119,50	US\$ 239,00
Acelerómetro WIT HWT905	1	US\$ 94,50	US\$ 94,50
Sensor ultrasonico XX630A1KAM12	6	US\$ 290,00	US\$ 1.740,00
Cámara Baseler Ace ACA720-290GC	2	US\$ 460,00	US\$ 920,00
Módulo GPS TOPGNSS	1	US\$ 615,00	US\$ 615,00
Modulo LPS Starter Set Super-MP-3D	1	US\$ 599,00	US\$ 599,00
Celda de carga WL 260 Load Cell SP-S AA	1	US\$ 113,00	US\$ 113,00
Electrónica y control	1	US\$ 600,00	US\$ 600,00
Estructura mecánica	1	US\$ 1.300,00	US\$ 1.300,00
TOTAL			US\$12.480,50

Figura 22: Costos totales del proyecto

6. Resultados

Debido a no poder construir y fabricar el robot físico real, se exponen como resultados los obtenidos de las simulaciones realizadas de cada uno de los modos de operación.

Se lograron desarrollar satisfactoriamente todas las etapas del desarrollo cinemático y dinámico, modelos suficientemente certeros que cimentaron una buena simulación precisa y estable del comportamiento del sistema, considerando que se cumplan las hipótesis planteadas desde un principio.

Se observa que los movimientos del robot de avance, retroceso y especialmente los giros cerrados, en las simulaciones, son ideales y prácticamente perfectos, cosa totalmente irreal. Una de las mayores características y desventajas del uso de orugas en robots móviles terrestres, es el hecho de la poca precisión que se tiene para controlar y realizar un giro con cierto radio de curvatura. Además, dichos giros se realizarían de forma continua, es decir, sin frenar el movimiento de avance, contrario a lo que se observa en las simulaciones en las cuales el robot se detiene, gira 90 grados hacia un lado y avanza nuevamente.

A partir de las simulaciones obtenidas se puede apreciar que el sistema satisface las especificaciones de operación y dimensionamiento, cumpliendo con los objetivos correspondientes planteados. Por otro lado, se puede observar que por más que el robot resuelve la navegación, el mismo se desvía un 5% aproximadamente de su trayectoria original.

Se destaca que la simulación es un factor importante del proyecto ya que permite visualizar de una manera más cercana a la realidad el funcionamiento del sistema. Se pueden variar todos los parámetros del sistema y estudiar su comportamiento, sin riesgos para el equipo real.

7. Discusión

Se discute sobre una mejora del entorno o mundo de la simulación, logrando implementar un terreno con mayor semejanza a uno real. Además, se puede mejorar el diseño del robot simulado, colocando una canasta o cajón con frutas o con alguna carga, encima del mismo, logrando así observar y analizar el movimiento del cajón a medida que el robot realiza la trayectoria o los movimientos indicados. Esto permitiría analizar la implementación de una especie de jaula en la parte superior para evitar la incertidumbre del modelo.

Por último, el método de control puede mejorarse usando control avanzado robusto que permite reducir el error a valores aceptables que permiten validar el control de la navegación.

8. Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó, analizó y modeló exitosamente un robot asistente de cosecha, sirviendo de buena forma como método de aprendizaje englobando varios contenidos de la cátedra Robótica II dictada por el profesor Ing. Roberto Haarth.

Se logró desarrollar un modelo completo y representativo de un primer prototipo de un robot para asistir durante las tareas de cosecha de vid, algo que en concreto no ha sido ampliamente estudiado hasta la actualidad. Esto induce a continuar su desarrollo, por la posibilidad innovador que el mismo presente.

Se espera lograr una mejora del diseño mecánico y electrónico del robot tal que el control y navegación sean compatibles con la aplicación, incluso se plantea una mejora que resuelva el problema de posicionamiento local otorgando una mejor y más eficiente desarrollo de la trayectoria del robot.

Al no considerar el comportamiento no ideal de sensores, es posible que se presenten inestabilidades durante el funcionamiento. Esto, a su vez, enfatiza la importancia de la selección de actuadores y sensores, ya que una mala selección puede generar un mal desempeño, o hasta llevar al sistema a una desestabilización y eventual falla. Una implementación a futuro es agregar la dinámica de los sensores, motores, electrónica y control; al modelo del sistema, para corregir las inestabilidades que estos causan.

Considerando los costos y tiempo de elaboración del proyecto, se considera que están dentro de los valores de mercado aceptables, quizás con un pequeño margen, para sus dimensiones y su uso específico. Con ello, se acepta la viabilidad del robot, pero se incentiva a la reducción de costos para hacerlo un producto más competitivo.

El desarrollo del proyecto ha englobado los temas desarrollados en la cátedra de Robótica II e integrado los mismos en una aplicación tangible, bajo una situación en la que es posible desenvolverse en el futuro, tanto desde lo profesional como la investigación. Aún más, se deja abierta la posibilidad de profundizar en el desarrollo del proyecto, a fin de ser presentado como Proyecto Final de Carrera, en caso de desearse.

9. Bibliografía

- Motor Brushless DC. <https://www.3xmotion.com/product/showproduct.php?id=63>
- Sistema de Orugas. https://es.made-in-china.com/co_puyitracks/product_New-Design-Dp-Py-148-Rubber-Track-Chassis-for-Carrying-Goods_ennhshuy.html
- Sensor Codificador Absoluto. <https://es.aliexpress.com/store/900241184?spm=a2g0o.detail.100005.2.70e320cfxilP0X>
- Acelerómetro Triaxial. <https://es.aliexpress.com/store/912184914?spm=a2g0o.detail.100005.2.4c8610ad15u7aF>
- Sensor de Ultrasonido. <https://www.se.com/ar/es/product/XX630A1KAM12/ussensor-ultrasonico-30-mm/>
- Cámara para Sistema de Visión Artificial. <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca720-290gc/>
- Módulo GPS (Global Positioning System). <https://es.aliexpress.com/store/1920594?spm=a2g0o.detail.100005.2.27997ab949y5hC>
- Módulo LPS (Local Positioning System). <https://marvelmind.com/product/starter-set-super-mp-3d/>
- Celda de Carga para Sistema de Báscula. <https://es.rs-online.com/web/p/galgas-extensiométricas/1873266>
- Software de Simulación Webots. <https://cyberbotics.com/>
- Mateo Sanguino, Tomas De Jesus, González Ramos, J. E., Carpio Cañada, J., Andújar Márquez, J. M., Carlson, T., Millán, J. d. R., y Ponce Gómez, F. (2014). Robótica móvil: Principios, tendencias y aplicaciones (1a. ed.). Huelva: Universidad de Huelva. <https://bibliotecas.uncuyo.edu.ar/explorador3/Record/0PESID012658>
- Material de cátedra y apuntes de clase - Robótica II, Ing. Roberto Haarth