



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

**AUTORES:**

**JOSÉ ALEJANDRO GALLARDO ANDRADE  
ANDRÉS DAVID GAONA ROMÁN**

**DIRECTOR: ING. DAVID LOZA  
CODIRECTOR: ING. VICTOR PROAÑO**

**SANGOLQUÍ, 30 ABRIL 2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

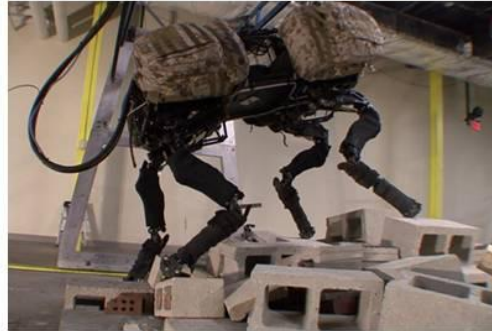
---

**CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN**



# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

---

**CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE**

# ESTADO DEL ARTE

## Clasificación de los robots

Por su estructura:

- a) Poliarticulados
- b) Móviles**
- c) Androide
- d) Zoomórfico
- e) Híbrido



a)



b)



c)



d)



e)



# ESTADO DEL ARTE

## Robótica móvil

- Un robot móvil se define como una máquina autómatas que posee la capacidad de movimiento dentro de un ambiente propio.
- Se considera que este tipo de autómatas están dotados de un nivel relativamente alto de inteligencia artificial.
- Características:
  - Debe trasladarse de un lugar a otro.
  - Debe evitar obstáculos mientras se mueve.
  - Debe evitar condiciones inapropiadas para su funcionamiento
  - Debe realizar alguna tarea.





# ESTADO DEL ARTE

## Clasificación de los robots móviles

- Por el medio en que desenvuelven

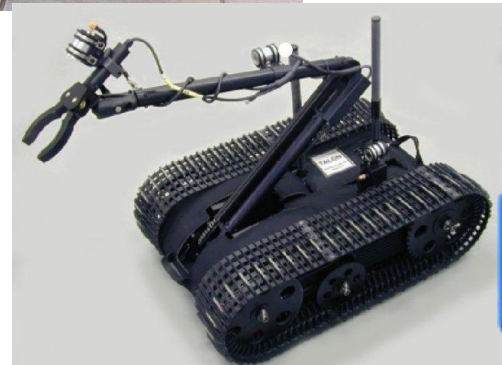
- Aéreos
- Acuáticos
- **Terrestres**
  - a) Con miembros articulados
  - b) **Con estructura rodante**



a)



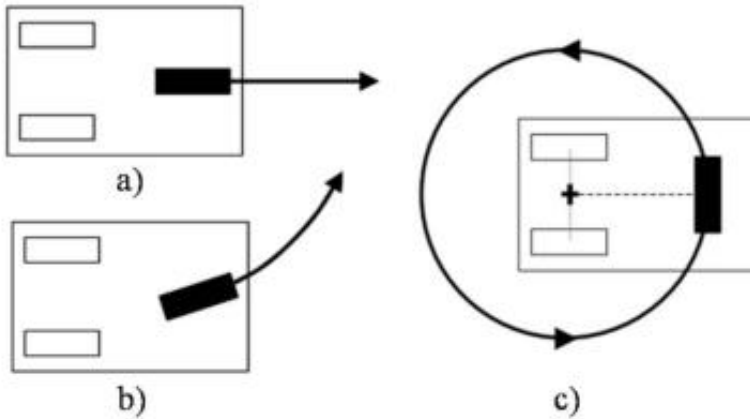
b)



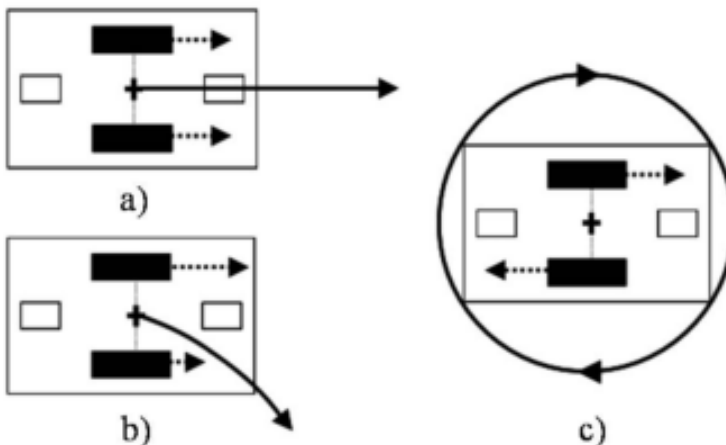
# ESTADO DEL ARTE

## Mecanismos de traslación

- Desplazamiento por rueda motora única



- **Desplazamiento diferencial**

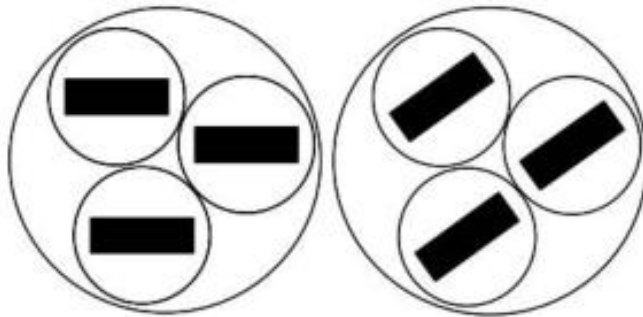




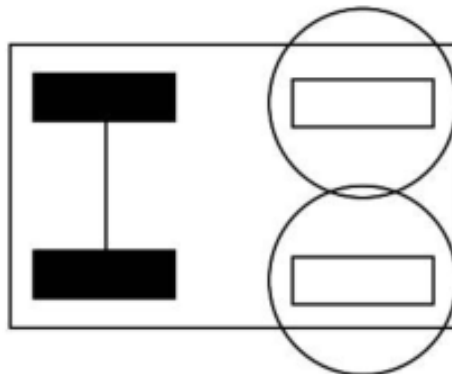
# ESTADO DEL ARTE

## Mecanismos de traslación

- Desplazamiento por ruedas sincrónicas

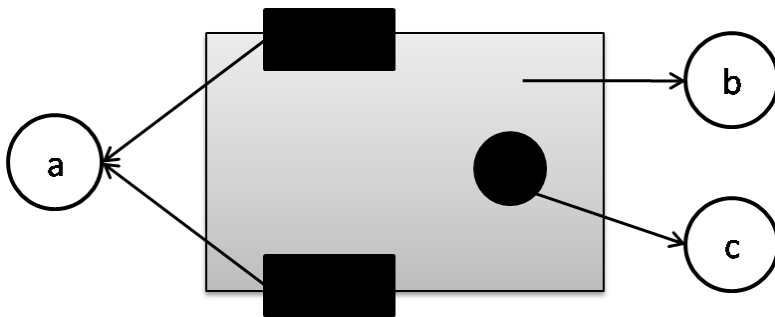


- Desplazamiento de Ackern

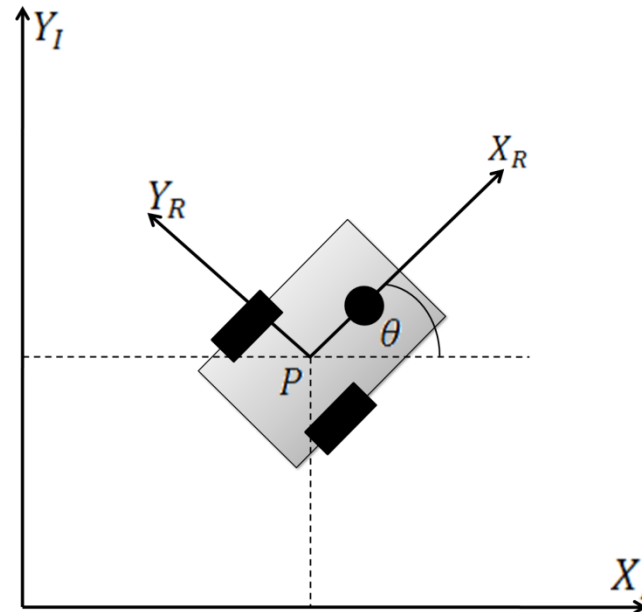


# ESTADO DEL ARTE

## Cinemática del robot móvil



- a) Ruedas motrices
- b) Bastidor
- c) Rueda seguidora



Vector de posición global  $\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$

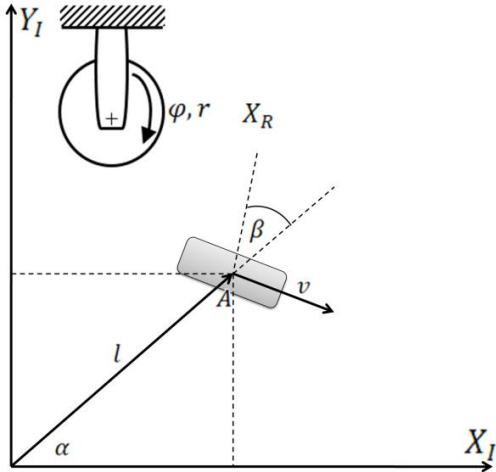
Matriz de transformación  $R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Vector de posición local  $\xi_R = R(\theta)\xi_I$

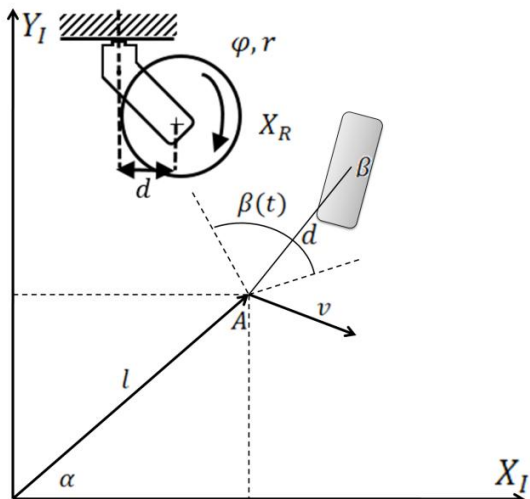
# ESTADO DEL ARTE

## Limitaciones de cinemática del robot móvil

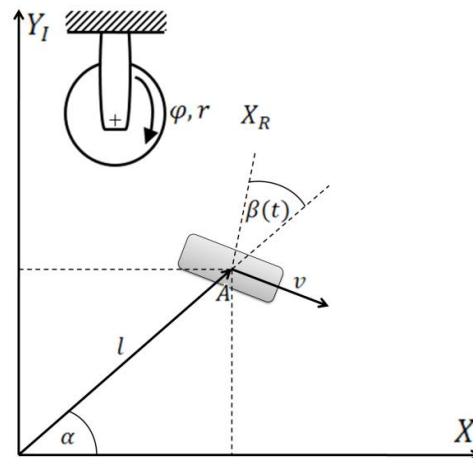
- Rueda fija estándar



- Rueda de castor



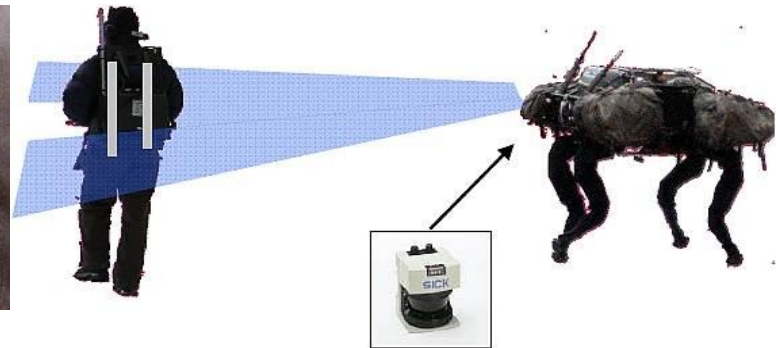
- Rueda orientable estándar



# ESTADO DEL ARTE

## Percepción

- La percepción como capacidad de los seres vivos, obedece a los estímulos cerebrales que son logrados a través de los sentidos (vista, olfato, tacto, oído y gusto), los cuales dan una realidad física del entorno en el que un individuo se desenvuelve





# ESTADO DEL ARTE

## Localización de un robot móvil

¿Donde estoy?, ¿Cómo voy a alcanzar un objetivo?



- Odometría: Es el uso de la información de sensores de movimiento para estimar cambios de posición en el tiempo.



# ESTADO DEL ARTE

## Localización y mapeo simultáneos

En la teoría, una medida exacta del giro de sus ruedas, combinada con un modelo exacto de su movimiento, nos permitirían determinar exactamente la posición del robot.

En la práctica, los sensores no son totalmente confiables y presentan incertidumbre derivada de las imperfección de construcción y modelos matemáticos empleados.

Se utiliza métodos probabilísticos para reducir el error generado por la mediciones de los sensores.

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \times P(A)}{P(B)}$$

Teorema de Bayes

Filtro extendido de Kalman

Maximización de la Expectativa

Filtro de partículas







# ESTADO DEL ARTE

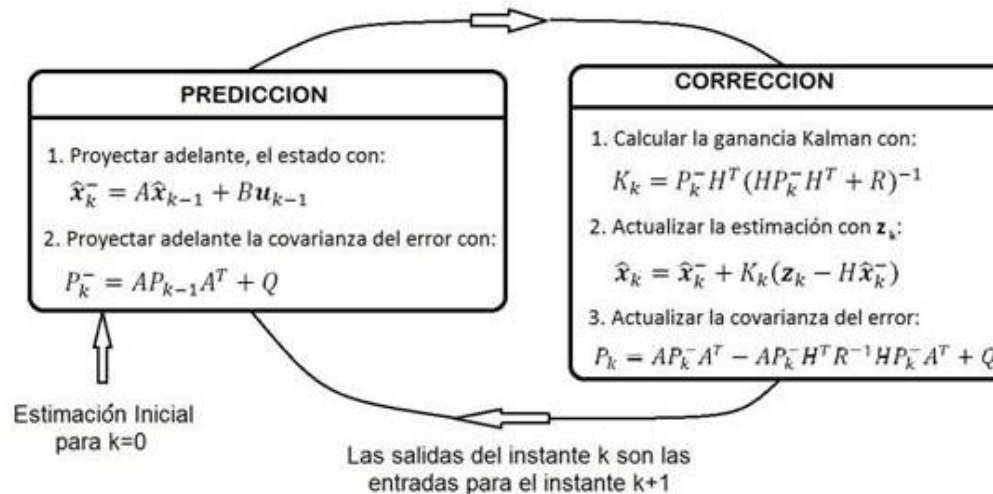
## Localización y mapeo simultáneos Filtro extendido de Kalman

Componentes:

- Modelo de estado: Variables de interés (posición y velocidad)
- Modelo dinámico: Describe el modelo de estado en el tiempo
- Modelo de observación: Mediciones de los sensores
- Modelo de control: Comandos de control

Algoritmo:

- Predicción: del vector de estado y del modelo de observación.
- Corrección: Mejora el modelo de estado previsto basado en los componentes del filtro.





# ESTADO DEL ARTE

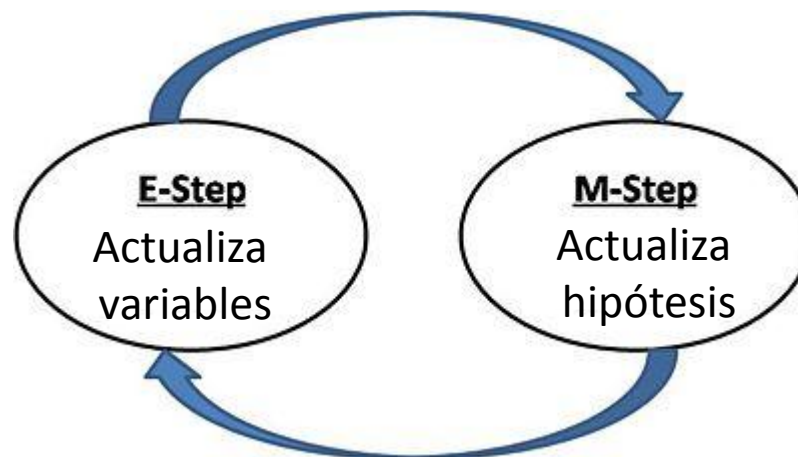
## Localización y mapeo simultáneos Maximización de la expectativa

Componentes:

- Modelo de estado: Variables de interés (posición y velocidad)
- Modelo dinámico: Describe el modelo de estado en el tiempo
- Modelo de observación: Mediciones de los sensores
- Modelo de control: Comandos de control

Algoritmo:

- Expectativa: Se obtiene una posible siguiente posición a partir del modelo de estado y observación
- Maximización: Mejora el modelo de estado previsto matemáticamente.





# ESTADO DEL ARTE

## Localización y mapeo simultáneos Filtro de partículas

### Componentes:

- Partículas: Posibles estados
- Pesos probabilísticos: Valores numéricos que indican probabilidad de una partícula
- Modelo de observación: Mediciones de los sensores
- Modelo de control: Comandos de control

### Algoritmo:

- Inicialización: Se crea un conjunto de partículas ordenados por los pesos probabilísticos.
- Actualización: Se calcula un nuevo valor para cada partícula.
- Estimación: Se reordena el conjunto de partículas.



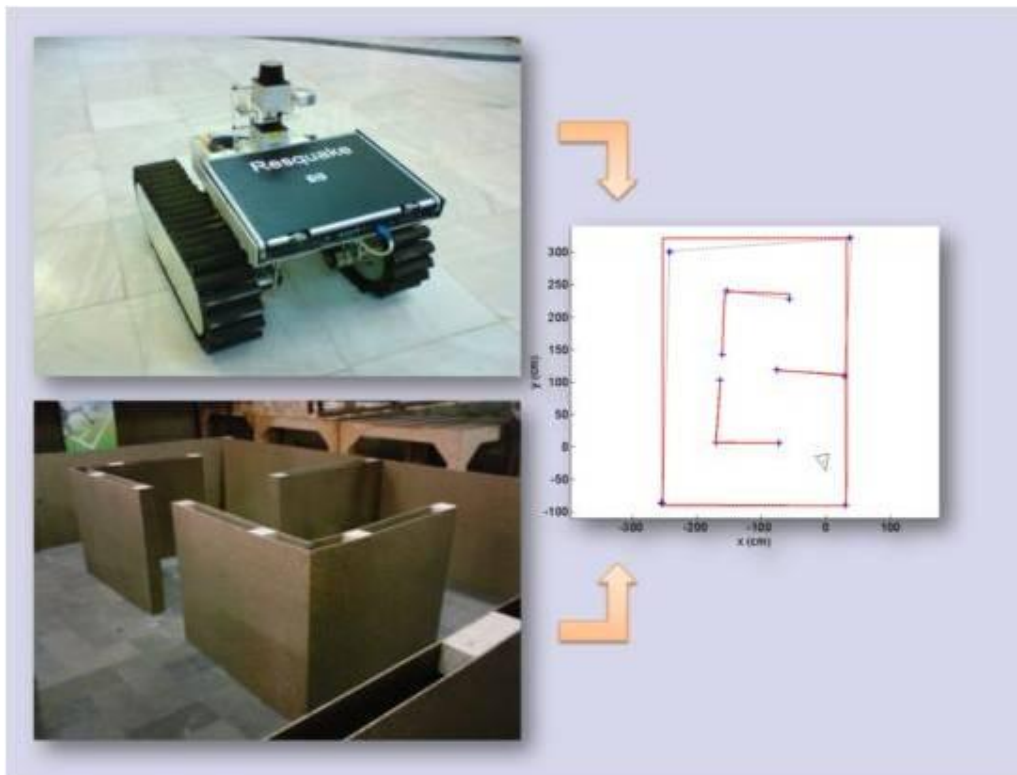


# ESTADO DEL ARTE

## Localización y mapeo simultáneos

Al integrar sensores, actuadores y algoritmos se puede crear un robot con un cierto nivel de autonomía.

La localización y mapeo simultáneos (SLAM) es uno de los resultados de dicha integración.



- EFK SLAM
- FastSLAM 1.0
- FastSLAM 2.0
- L-SLAM
- GraphSLAM
- LSD SLAM

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

---

**CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA Y DISEÑO  
DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL**



# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Definición de necesidades

Concepto	#	Propone	R/D	Necesidad
Función	1	U	R	Diseño para interiores
	2	U	R	Navegación Reactiva
	3	U/D	R	Restringir velocidad de desplazamiento
	4	U/D	R	Sistema inalámbrico
	5	U	R	Capacidad de realizar SLAM
	6	U	R	Operatividad prolongada
Manufactura	7	U/D	R/D	Implementar componentes pequeños
	8	D	R	Estabilidad estática y dinámica
	9	U/D	D	Estructura liviana
	10	D	D	Uso de materiales nuevos
Control	11	D	R/D	Movimientos sencillo
	12	D	R/D	Sensores pequeños y compatibles
	13	U	R	Tecnología de código abierto
Costos	14	D	D	Mantener costos más bajos posibles

Leyenda. U: Usuario, D: Diseñador, R: Requerimiento, D: Deseo.







# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Definición de especificaciones

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
1, 7, 12, 14	Dimensiones máximas de la plataforma	$50 \times 50 \times 20$	<i>cm.</i>
2, 3, 8, 11	Velocidad promedio de desplazamiento	0,5	$\frac{m}{s}$
1, 7, 9, 12	Peso máximo de la plataforma	10	<i>kg.</i>
1, 3, 11, 14	Número mínimo de motores	2	—
1, 8, 11, 14	Número de puntos de apoyo	4	—
4, 6, 14	Duración mínima de la batería	1	<i>hora</i>
1, 2, 5, 12, 14	Distancia máxima de percepción	5	<i>m</i>
5, 12, 13	Uso de tecnología abierta	—	—
14	Costo máximo de producción	700	<i>USD</i>

## Estructura funcional

#	Módulo	Funciones
1	Base	Principio de desplazamiento
2	Tracción	Actuadores de desplazamiento
3	Potencia	Acondicionamiento de señales de control
4	Energético	Aporta energía a los componentes
5	Navegación reactiva	Detecta obstáculos
6	Odometría	Registra cambios de posición
7	Adquisición y mando	Adquisición de datos Control en bajo nivel
8	Visión	Permite realizar SLAM
9	Control	Controla los movimientos del robot

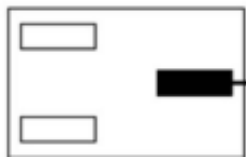




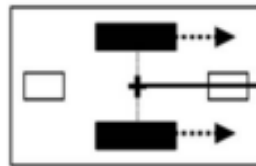
# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 1 - Base

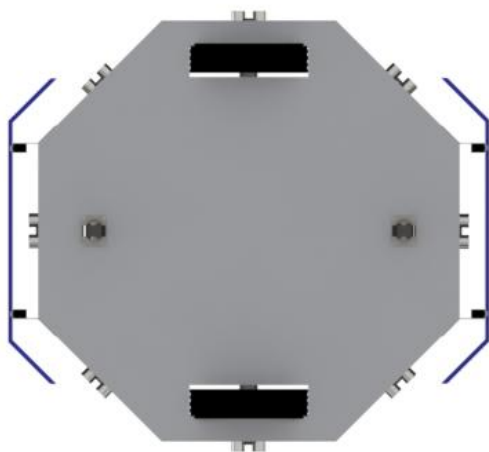
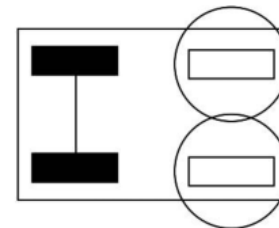
Desplazamiento por rueda motora única



Desplazamiento diferencial



Desplazamiento de Ackerman



	Costo	Implementación	Control	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.17	0.11	0.04	0.32	2
Solución B	0.25	0.17	0.07	0.49	1
Solución C	0.08	0.06	0.06	0.19	3



# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 2 - Tracción

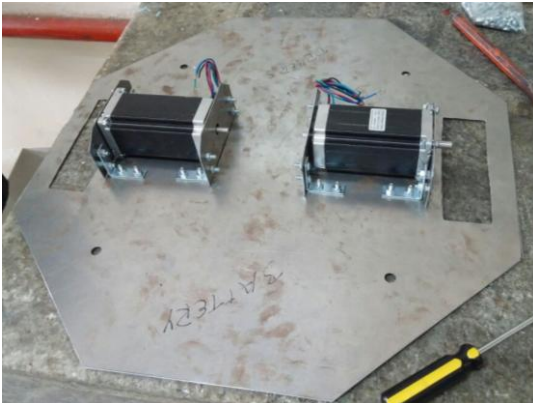
Motor con estator bobinado



Motor paso a paso



Servomotor

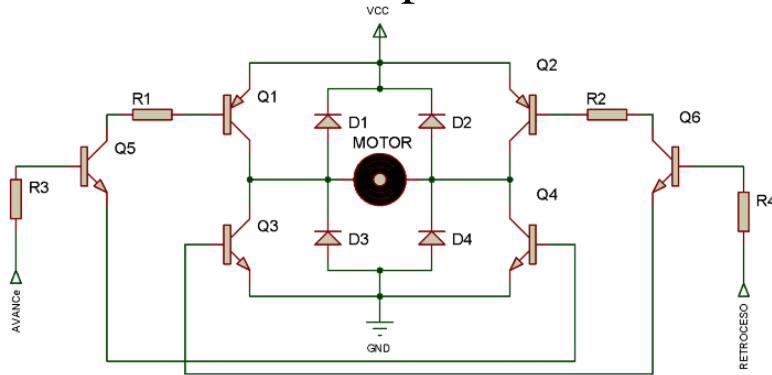


	Costo	Implementación	Control	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.25	0.03	0.06	0.33	2
Solución B	0.17	0.08	0.11	0.36	1
Solución C	0.08	0.06	0.17	0.31	3

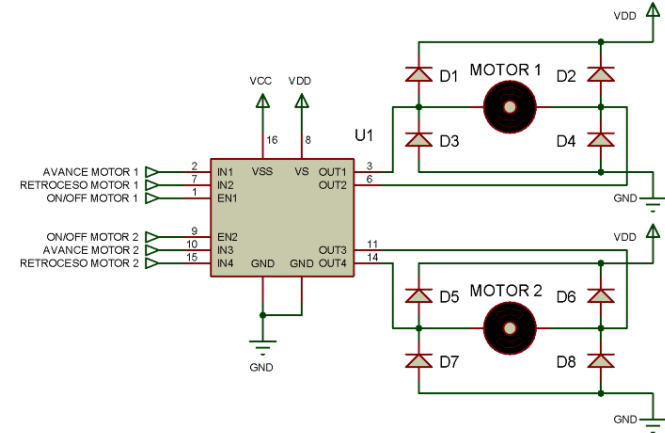
# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 3 - Potencia

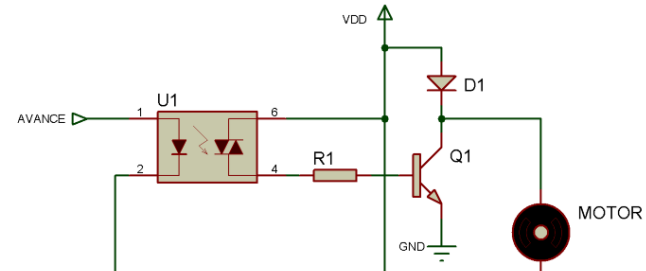
Puente H con componentes discretos



Puente H con circuito integrado



Control con optoacopladores



	Costo	Funcionamiento	Modularidad	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.21	0.08	0.04	0.33	2
Solución B	0.08	0.08	0.04	0.21	3
Solución C	0.21	0.17	0.08	0.46	1

# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 4 - Energético

Celda Solar



Alternador



Batería



	Costo	Implementación	Tamaño	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.08	0.04	0.06	0.18	3
Solución B	0.17	0.04	0.14	0.35	2
Solución C	0.25	0.08	0.14	0.47	1



# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 5 – Navegación reactiva

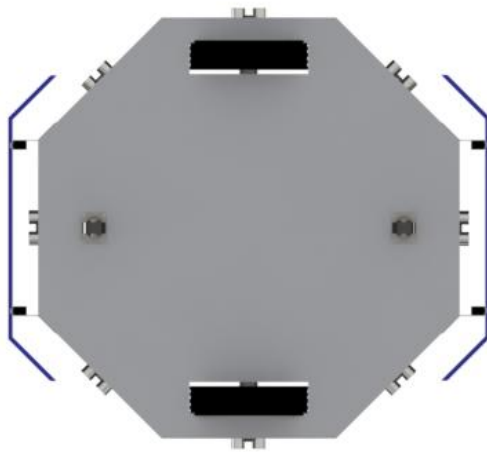
Lidar



Sonar



Cámara de video



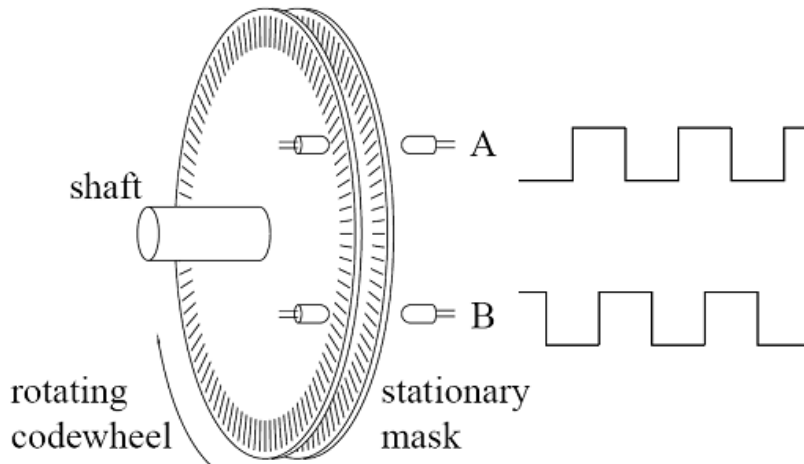
	Costo	Precisión	Robustez	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.13	0.08	0.04	0.25	3
Solución B	0.25	0.08	0.13	0.46	1
Solución C	0.13	0.08	0.08	0.29	2



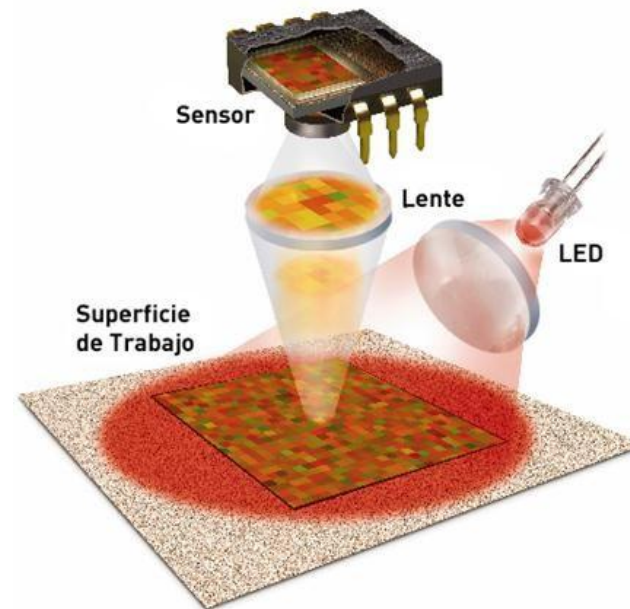
# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 6 - Odometría

### Encoder



### Sensor de desplazamiento óptico



	Costo	Precisión	Robustez	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.25	0.28	0.11	0.58	1
Solución B	0.25	0.11	0.06	0.42	2

# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 7 – Adquisición y mando

Arduino



Raspberry PI



BeagleBone



	Costo	Disponibilidad	Programación	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.17	0.14	0.03	0.33	2
Solución B	0.25	0.14	0.08	0.47	1
Solución C	0.08	0.06	0.06	0.19	3

# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 8 - Visión

Kinect



Xtion



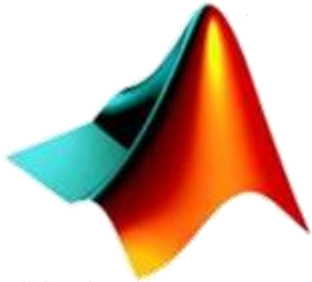
	Costo	Disponibilidad	Robustez	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.33	0.22	0.08	0.64	1
Solución B	0.17	0.11	0.08	0.36	2



# DISEÑO DE LA PLATAFORMA

## Módulo 9 - Control

Matlab



MATLAB

Sistema Operativo Robótico (ROS)

ROS

	Costo	Programación	Información	$\Sigma$	Orden de selección
Solución A	0.17	0.22	0.08	0.47	2
Solución B	0.33	0.11	0.08	0.53	1



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

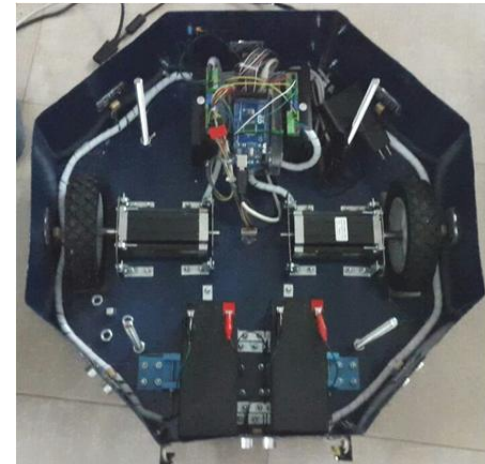
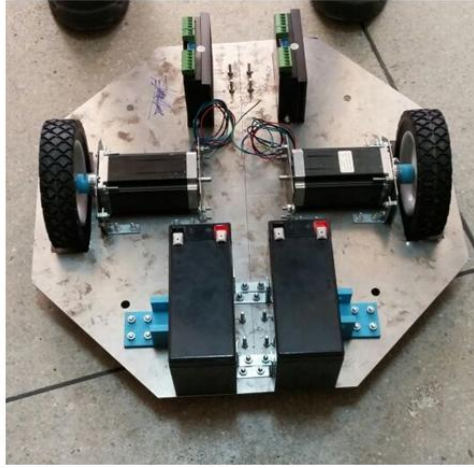
---

**CAPÍTULO 4 – CONSTRUCCIÓN  
Y FUNCIONAMIENTO**





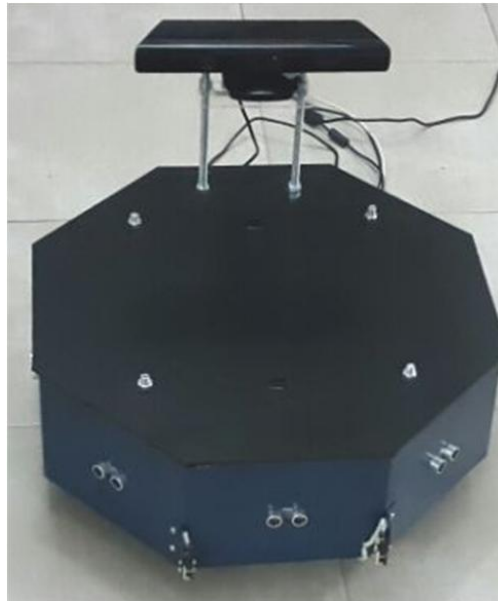
# CONSTRUCCIÓN







# CONSTRUCCIÓN





# FUNCIONAMIENTO

## Primera evaluación

Resultados



a)

b)





# FUNCIONAMIENTO

## Segunda evaluación

### Resultados

Intervalo	Corriente	Voltaje
0 : 00 h	4,92 A	24,37 V
1 : 00 h	5,01 A	23,97 V
2 : 00 h	5,38 A	22,27 V
3 : 00 h	5,59 A	21,45 V
4 : 00 h	5,95 A	20,14 V
5 : 00 h	6,12 A	19,59 V
6 : 00 h	6,55 A	18,31 V
7 : 00 h	-	17,53 V





# FUNCIONAMIENTO

## Tercera evaluación

### Resultados

Recorrido	Desviación en $x$	Desviación en $y$
1	15,6 <i>cm</i>	3,3 <i>cm</i>
2	12,4 <i>cm</i>	3,7 <i>cm</i>
3	14,7 <i>cm</i>	2,9 <i>cm</i>
Promedio	14,2 <i>cm</i>	3,3 <i>cm</i>
Porcentaje	7,9 %	1,8 %

Trayectoria abierta

Recorrido	Desviación en $x$	Desviación en $y$
1	47,3 <i>cm</i>	51,8 <i>cm</i>
2	53,1 <i>cm</i>	55,9 <i>cm</i>
3	43,4 <i>cm</i>	54,7 <i>cm</i>
Promedio	47,9 <i>cm</i>	54,1 <i>cm</i>
Porcentaje	26,6 %	30,1 %

Trayectoria cerrada





# FUNCIONAMIENTO

## Cuarta evaluación

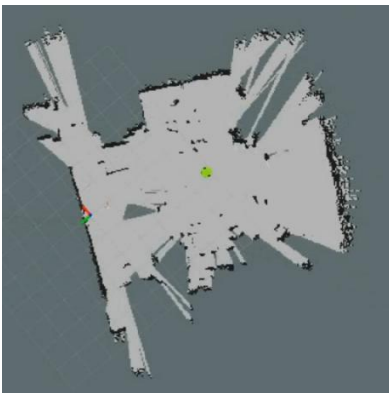




# FUNCIONAMIENTO

## Quinta evaluación

### Resultados



Medida	Desviación en x	Desviación en y
1	3,2 <i>cm</i>	3,9 <i>cm</i>
2	3,8 <i>cm</i>	2,9 <i>cm</i>
3	4,5 <i>cm</i>	3,2 <i>cm</i>
4	3,3 <i>cm</i>	3,8 <i>cm</i>
5	4,1 <i>cm</i>	4,2 <i>cm</i>
Promedio	3,78 <i>cm</i>	3,60 <i>cm</i>
Porcentaje	2,10 %	2,00 %





**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

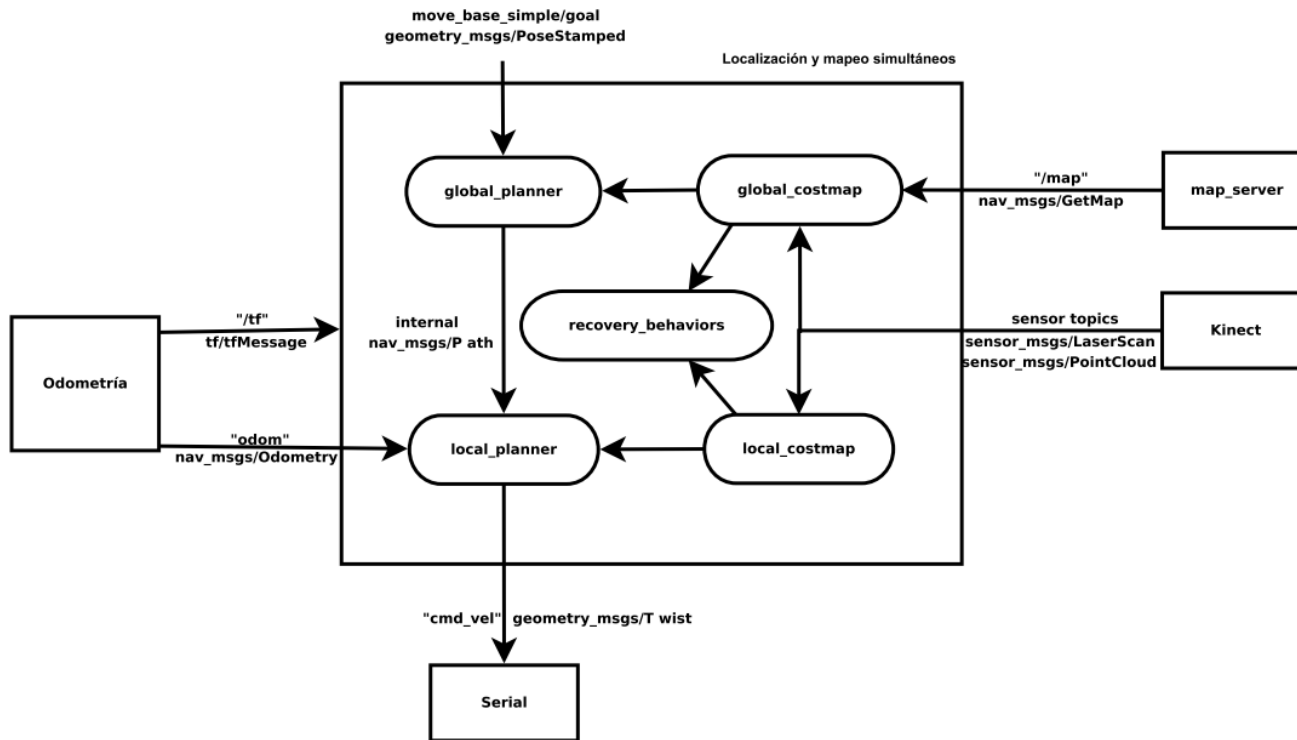
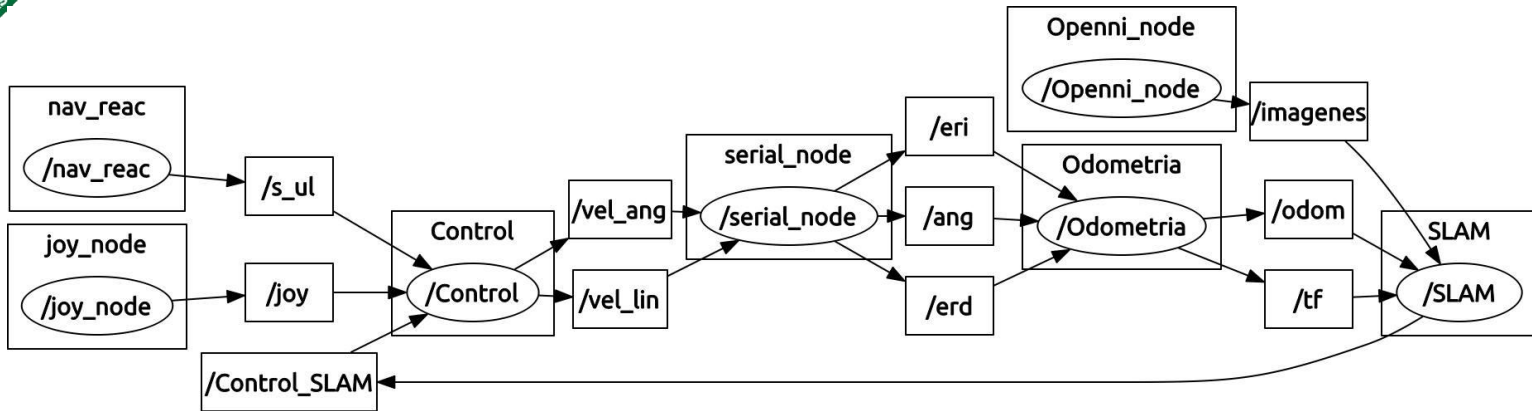
---

---

**ESTRUCTURA DEL ROBOT EN ROS**



# ESTRUCTURA DEL ROBOT EN ROS



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

---

**CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES  
Y TRABAJOS FUTUROS**



# CONCLUSIONES

1. Se diseñó y construyó un prototipo de plataforma robótica móvil para interiores, cuyo movimiento es producido por motores a pasos configurados para desplazamiento diferencial. El robot es capaz de realizar localización y mapeo simultáneos apoyado en mecanismos de odometría y visión. Adicionalmente, la plataforma puede ser teleoperada mediante un mando remoto y es capaz de detectar obstáculos dinámicos gracias a un sistema de navegación reactiva. Finalmente, el control del robot móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS) e integra componentes de tecnología abierta.
2. A través del análisis del estado del arte sobre robótica móvil se ha podido entender conceptos fundamentales que han sido aplicados en el trabajo. También, se ha recopilado información sobre las diferentes aportaciones en este campo obteniendo una idea de los últimos logros y adelantos en este campo a nivel nacional, regional y mundial. Por último, la investigación de los trabajos existentes ha servido para implementar algunas ideas interesantes en el proyecto desarrollado.





# CONCLUSIONES

5. La implementación de la capacidad del robot de realizar localización y mapeo simultáneos permite concluir que los mapas creados tiene un alto nivel de parentesco con el patrón reproducido, permitiendo tener mayor independencia del entorno en el que se desenvuelve el robot móvil. También, se concluye que el algoritmo de corrección de odometría reduce significativamente el error obtenido durante las pruebas sin dicho algoritmo. De esta manera se puede tener una estimación más confiable de la posición actual de la plataforma, lo que supone un aporte notable a la autonomía del robot.
6. El desarrollo del proyecto ha permitido generar conocimiento sobre robótica móvil. Por tal motivo, es importante realizar la publicación de un artículo científico sobre los detalles diseño, construcción, evaluación y puesta en marcha del presente trabajo. Es así que dicho artículo se ha dividido en varias partes que se encuentra en proceso de aprobación en revistas con distintos enfoques académicos.





# CONCLUSIONES

7. Se ha evaluado el funcionamiento del robot móvil en cada etapa de desarrollo. Los resultados presentan que el mecanismo de desplazamiento diferencial es adecuado para la operatividad de la plataforma en interiores, pues los espacios son reducidos impidiendo las curvas de desplazamiento con radios de giro grandes. Otro punto destacable en las pruebas realizadas es la ausencia de retardos en la comunicación entre el controlador desarrollado en ROS y el autómatas. También, se concluye que las señales provenientes de los sensores, instalados en el batidor, requieren algoritmos computacionales de acondicionamiento que corrijan los datos adquiridos. Por último, la plataforma funcionando a toda su capacidad es capaz de cumplir el objetivo de generar mapas y localizarse dentro de ellos de forma simultánea.







# RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

1. La construcción de una plataforma robótica móvil en módulos permite la incorporación de nuevos elementos para variar el funcionamiento. Así, en futuros trabajos el módulo de visión permitiría desarrollar odometría visual, mecanismo de percepción que reemplazaría a los encoders y giroscopios como método para determinar valores de desplazamiento del robot. Esta implementación reduciría notablemente los efectos de los errores sistemáticos y no sistemáticos del módulo de odometría.
2. Otro cambio notable del robot móvil cuando se agrega módulos de visión, es la capacidad de teleoperarlo desde una estación fija. Para ello se puede incluir una conexión en red que permita intercambiar información entre computadores. Al desarrollar este tipo de operación del robot, es necesario señalar que se operaría dentro de los rangos de un área cerrada. Esto abre otro campo de desarrollo dentro de robótica móvil, pues la teleoperación desde estación fija sería mucho más interesante si se apoya en un robot móvil para exteriores.





# RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

3. El desarrollo de un robot autónomo permite concebir nuevas ideas dentro de la robótica. Al incluir un robot social se puede crear un mayordomo que interaccione con los usuarios, operarios y visitantes de un ambiente como un laboratorio. La interacción significa que el robot pueda percibir comandos visuales o sonoros. Otra forma de interacción con personas o elementos del ambiente se puede conseguir al incorporar un manipulador. Esto podría ayudar al robot a repartir correspondencia, intercambiar objetos entre estaciones, asistir al humano en actividades de servicio como mesero, entre otros.
4. Otra iniciativa que llama la atención es la elaboración de un control distribuido que permita incorporar varios robots móviles con características semejantes y crear un sistema multirobot. Estos sistemas que puede cumplir una tarea en forma conjunta, es decir, cada robot puede realizar una tarea en forma individual para obtener un beneficio propio o conjunto. El desarrollo de este sistema es ardua pues el comportamiento de un robot afecta al de otros.



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM  
(SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)**

---

---

**GRACIAS**