

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS



“EXPLORACIÓN DISTRIBUIDA PARA VEHÍCULOS MÓVILES TIPO DIFERENCIAL”

Presenta:

CRISTIAN JOSUÉ MORENO RIVERO

Director de Tesis:

Dr. Antonio Benítez Ruiz

Coasesor:

Dr. Eduardo López Domínguez

Juan C. Bonilla,

Puebla. Noviembre 2011

Contenido

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	4
1.1 Introducción.	4
1.2 Objetivo General.....	8
1.3 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Justificación.	9
1.5 Recursos de Hardware y Software.	10
1.6 Alcances y limitaciones	11
MARCO TEÓRICO	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 ROBÓTICA.....	13
2.3 IMPORTANCIA DE LOS ROBOTS MÓVILES.....	14
2.4 LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL.....	15
2.4.1 Diferencial	16
2.4.2 Sincronizada	17
2.4.3 Coche.....	17
2.4.4 Triciclo	17
2.5 LOCALIZACIÓN, EXPLORACIÓN Y GENERACIÓN DE MAPAS EN LA ROBÓTICA MÓVIL.....	18
2.5.1 Localización	19
2.5.2 Exploración.....	25
2.5.3 Reconstrucción de Mapas	28
2.6 SISTEMAS DISTRIBUIDOS.....	30
2.6.1 El Modelo Cliente Servidor.....	31
2.7 SISTEMAS MULTI-ROBOT.....	33
2.7.1 Exploración Multi-Robot	33
2.7.2 Taxonomía de los Sistemas Multi-Robot.....	34
2.8 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	39
2.8.1 ToA	39
2.8.2 AoA.....	41
2.8.3 RSS.....	42
DESARROLLO DEL PROYECTO	43
3.1 Robot Móvil – Tipo Diferencial.....	43

3.2 Taxonomía del Sistema MultiRobot.....	44
3.3 Sistema de Comunicación con Xbee.....	46
3.4 Algoritmo de Localización del Robot.....	48
3.4.1 Teorema del Coseno.....	49
3.4.2 Intersección de dos Circunferencias	50
3.5 Algoritmo de Exploración.....	53
3.6 Construcción del Mapa.....	55
IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	56
4.1 Estructura de la Simulación.....	56
4.2 Async Profesional	57
4.3 Simulación del Dash Board.....	58
4.4 Simulación del Robot.....	60
PRUEBAS Y CONCLUSIÓN.....	62
5.1 Esquema de Pruebas.....	62
5.2 Ambiente Simulado para las pruebas	62
5.3 Ambiente Simulado para las pruebas	63
5.4 Conclusiones.....	65
5.5 Trabajos Futuros.....	65
BIBLIOGRAFÍA	67

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción.

La Robótica es el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten diseñar, fabricar y programar dispositivos mecánicos dotados de un determinado grado de inteligencia, comúnmente llamados robots. Éstos sustituyen a los hombres en diferentes áreas y en otras ocasiones son utilizados en tareas en las cuales al humano le es imposible desempeñarse o son muy peligrosas [6] [7].

Un robot es un sistema que es capaz de percibir información del exterior, entender su entorno y realizar tareas. Un robot puede ser un manipulador reprogramable de uso general que efectúa diferentes trabajos; un robot puede poseer inteligencia y estar controlado por una computadora [6] [7].

La Robótica se apoya en diferentes áreas como: electrónica, matemáticas, ingeniería mecánica, física y ciencias de la computación y en nuevas disciplinas como inteligencia artificial, reconocimiento de patrones, la microelectrónica, entre otras.

La arquitectura de un robot está definida por el tipo de configuración y su forma física para poderse desempeñar en diferentes tipos de ambientes. La clasificación de los robots, con respecto a su arquitectura, se hace en función de los diferentes grupos de tareas y de la información recibida [8][9]:

- Poliarticulados
- Móviles
- Androides
- Híbridos

Muchas de los sistemas de información que se utilizan en la actualidad no trabajan de forma centralizada; es decir tiene que ser sistemas que se coordinen mediante un canal de comunicación para llevar a cabo tareas en conjunto. Los sistemas distribuidos son componentes conectados en red que se comunican y coordinan sus acciones mediante el paso de mensajes [10]; por lo tanto este sistema debe tener concurrencia entre sus procesos, fallos independientes y carecer de un sistema global de tiempo.

Hasta hace unos años la investigación en el ámbito de la robótica se había concentrado en robots simples o sistemas de solución de problemas que no involucran técnicas de robótica distribuida o colaborativa; las necesidades de los problemas del mundo real fueron aumentando se dieron cuenta que muchas tareas se hacen de forma colaborativa es decir, lograr una meta o un objetivo depende del trabajo de más de una persona, esto sucede en muchas áreas donde se aplica la robótica, por lo tanto a finales de los 80's empiezan los investigadores a realizar trabajos en el área de robótica colaborativa, es decir robots que se coordinan y se comunican para llevar a cabo una tarea en conjunto.

Los robots móviles brindan la posibilidad de navegar en distintos terrenos y tienen aplicaciones como: exploración minera, exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas,

limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terreno, y también son utilizados como plataformas móviles que incorporan un brazo manipulador.

Los inicios de la robótica móvil distribuida empieza con el paradigma de la robótica de control basado en el comportamiento [1].

Dado que el paradigma basado en el comportamiento de robótica móvil está apoyado en inspiraciones biológicas, muchos investigadores de robótica colaborativa se han dedicado a observar y analizar las características sociales de insectos y animales más grandes, para aplicar estos hallazgos al diseño de sistemas de multi-robots.

El trabajo en este ámbito ha demostrado la habilidad de grupos de multi-robots para acudir en masa, dispersarse, agregarse, buscar y seguir huellas [2]. Hasta cierto punto, la cooperación en animales superiores, tales como la jauría de lobos, ha generado avances en control cooperativo. Se han efectuado estudios significativos en el sistema depredador-presa, aunque principalmente en simulación [2]. La competencia en sistemas de multi-robots, tales como los encontrados en animales superiores incluidos los humanos, están comenzando a ser estudiados en dominios tales como multi-robots futbolistas [3].

Muchos investigadores le están apostando a la robótica móvil distribuida, desarrollando principalmente sus proyectos en el ámbito de:

- Planeación de movimientos de multi-robots
- Arquitecturas para cooperación de multi-robots.
- Auto-localización mediante comunicación inalámbrica.
- Coordinación basada en comportamiento de animales.

La robótica móvil tiene un gran impacto en el ámbito industrial. Esto ha ocasionado un creciente interés por el estudio de sistemas robóticos distribuidos es decir sistemas que están integrados por varios robots, dichos sistemas son conocidos como Sistemas Multi-Robot (SMR).

Los sistemas Multi-Robot han demostrado ciertas ventajas (en algunas tareas) que los hacen más eficientes respecto a sistemas monorobot. Actualmente la investigación en esta área ha progresado en muchos aspectos que incluyen arquitecturas, métodos de comunicación, coordinación, control entre muchos otros.

Se puede decir que un SMR está conformado por varios robots que permiten realizar de manera conjunta una determinada tarea. Dependiendo del proyecto cada robot está dotado de ciertas características mecánicas, eléctricas y de cómputo que le permiten mostrar comportamientos específicos. Lo que significa que un SMR puede estar conformado por robots de diferentes tipos de arquitecturas.

Un SMR es naturalmente una extensión de la investigación en sistemas monorobot y muchos investigadores ya la consideran una disciplina [4], la cual es el resultado de muchos estudios, trabajos y esfuerzos de investigación que representan un amplio conocimiento en problemas como la coordinación, la comunicación, la localización, el aprendizaje y que han generado diferentes enfoques y paradigmas.

De manera formal podemos decir que un Sistema Multi-Robot SRM es un grupo de robots homogéneos o heterogéneos, que tienen las siguientes características [5]:

- **Cooperación:** Es la unión explícita o implícita de operaciones u acciones entre un grupo de individuos.
- **Conciencia:** Es el conocimiento que un individuo tiene de sí mismo y de su entorno.
- **Comunicación:** Es el acto de enviar o transmitir información de manera directa o indirecta a otro u otros individuos.
- **Coordinación:** Es el mecanismo mediante el cual se disponen metódicamente todos los individuos y componentes del sistema para unir esfuerzos que contribuyan a su objetivo.

Se dice que un grupo de robots es homogéneo si cada uno de ellos comparten características y capacidades similares como por ejemplo, capacidad de procesamiento y cómputo, mecanismos de comunicación, dispositivos sensoriales y de actuación etc. En caso contrario será heterogéneo.

Desde sus inicios hace más de tres décadas, el campo de los SMR ha experimentado un continuo crecimiento a través de muchos trabajos de investigación en diferentes aplicaciones, este proyecto se basará en la exploración de un ambiente controlado mediante robots móviles distribuidos es decir que son capaces de coordinarse y comunicarse para llevar a cabo la exploración y después reconstruir el ambiente, la comunicación será basada en puertos Xbee de forma inalámbrica.

1.2 Objetivo General

Reconstruir un ambiente controlado a partir de algoritmos de exploración distribuida utilizando comunicación inalámbrica en robots móviles.

1.3 Objetivos Específicos

- Instrumentar un sistema de comunicación inalámbrica utilizando antenas Xbee.

- Implementar un algoritmo de triangulación mediante dos puertos Xbee estáticos para auto-localizar un robot móvil utilizando antenas inalámbricas.
- Implementar un algoritmo distribuido, que permita la coordinación entre los robots y la exploración de un ambiente.
- Implementar un algoritmo de reconstrucción de un ambiente utilizando la información reportada por los robots durante sus movimientos de exploración.

1.4 Justificación.

En la actualidad muchas tareas que se desempeñan en el mundo real son de forma colaborativa, es decir son realizadas por más de una persona, por ejemplo en el ambiente industrial pintar un automóvil lo pueden realizar más de un manipulador y debe de existir comunicación y coordinación entre ellos para no repetir tareas y realizar el trabajo de forma más rápida, tomando en cuenta que cada manipulador realiza sus actividades de forma precisa y autónoma.

Las antenas Xbee son las más usadas por las arquitecturas de robots, un ejemplo de ellas es la arquitectura Biolod que tiene implementado un puerto Xbee pero los costos de dicho robots son elevados. Este tipo de antenas son muy usadas porque utilizan una comunicación inalámbrica de bajo consumo basa en el estandar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas personales, con una tecnología domótica.

Otro aspecto importante en la robótica móvil es la exploración de ambientes, muchos robots móviles usan algoritmos de exploración que permiten reconocer como está conformado el ambiente donde trabajan, por ejemplo: si el robot detecta un obstáculo, entonces guardan la información respecto a la posición donde se encuentra para después utilizarla en la representación del ambiente que permitan planear rutas libres de colisiones. Para llevar a cabo esta tarea, es necesario que el robot conozca su posición en cualquier instante de tiempo mientras se desplaza dentro de un ambiente. Actualmente esta autolocalización se puede hacer mediante un control odométrico o mediante alguna otra técnica como el procesamiento de imágenes usando marcas. Existe una forma de localización como lo hacen las antenas de telefonía celular, usando dos puntos de referencias que estén estáticos y el tercero en movimiento; para lograr esta forma de localización es necesario implementar un algoritmo de triangulación usando la arquitectura Xbee.

Después de realizar una exploración del ambiente y conocer la posición de los obstáculos dentro de él, es posible aproximar la forma del ambiente a través de un algoritmo de reconstrucción, el cual podrá ser utilizado por ejemplo para la planificación de rutas libre de colisión.

1.5 Recursos de Hardware y Software.

- Recursos de Hardware
 - 3 Robots 3P con adaptación a tarjeta Arduino.
 - 5 tarjetas Arduino.
 - 3 tarjetas para los robots.
 - 2 tarjetas para las bases que servirían para la triangulación.
 - 5 puertos Xbee
 - 3 puertos para los robots.
 - 2 puertos que serán bases para la triangulación de la auto-localización del robot
 - 2 Pcs o laptop que servirán de puertos base para la auto-localización y el banco de información.

- Recursos de Software
 - Lenguaje de Programación Visual C++
 - Lenguaje C++
 - Herramienta de programación de Arduino basado en c++
 - IDE Eclipse
 - Dlls para puerto Xbee en SO Windows

1.6 Alcances y limitaciones

- El principal alcance es dotar a la arquitectura del 3pi con un sistema de comunicación y coordinación usando puertos Xbee que permita la realización de tareas colaborativas.
- Expandir el algoritmo distribuido a más de 3 Robots.
- Plataforma que se adapte al manejo de más de 3 robots que sea flexible es decir que distribuyan las metas de forma equitativa y equilibrada.
- Comunicación continua y evitando el menor número de pérdida de datos.
- Topología que permita comunicar a los robots de forma rápida y con seguridad.
- Escases de memoria para llevar a cabo tareas complejas o almacenar datos en el robot.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el uso de robots es común en distintas actividades, ya que estos sistemas pueden someterse a trabajos pesados, repetitivos o peligrosos para el ser humano. Es por eso que con el avance de la tecnología se han creado nuevos prototipos que cumplan con las expectativas del ser humano.

El uso de robots se planeó como una alternativa para realizar trabajos repetitivos y fastidiosos en las industrias, y muchas de estas tareas representaba un riesgo para el hombre. Con la invención de estas máquinas que realizaban las tareas físicas del hombre, se pensaron en más soluciones para facilitar cualquier trabajo, y así el hombre poderse enfocar a tareas menos monótonas. Es por eso que ahora encontramos robots para cualquier tipo de tarea, ya sea industrial o doméstica.

Algunos robots domésticos que se han presentado en la actualidad son simples pero funcionales. Un robot que se utiliza en ambientes caseros es el robot aspirador [1], que está fundamentado en la robótica móvil.

La exploración y generación de mapas de ambientes es un tema fundamental en la robótica móvil, con múltiples aplicaciones en el mundo real, como búsqueda y rescate, manejo de materiales peligrosos, exploración planetaria, etc. El uso de un equipo de robots ofrece diversas ventajas sobre robots independientes, como es la concurrencia, con la cual se puede reducir el tiempo necesario para la exploración y la fusión de mapas para reducir los errores de medición. Para obtener una exploración eficiente con un equipo de robots se requiere una buena

coordinación entre los robots y que sea preferentemente tolerante a fallas, lo cual puede obtenerse mediante un algoritmo de coordinación distribuido.

2.2 ROBÓTICA

La robótica es un campo interdisciplinario que estudia en conjunto el diseño mecánico y electrónico que se compone por tecnología de sensores, sistemas lógicos por computadora e inteligencia artificial [2].

La palabra robot se origina del vocablo checo robot, que significa trabajo forzado. Con el paso del tiempo se ha definido más específicamente la palabra robot, y el Instituto del Robot de América da una definición más precisa de su significado: “Un robot es un manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, partes, herramientas, o dispositivos especiales, a través de movimientos programados variables para la realización de una variedad de tareas” [2]. Como ya se sabe, existen diferentes tipos de robots que se emplean para algún trabajo específico y se dividen de la siguiente manera:

- **Móviles:** Estos robots tienen como función desplazarse de un lado a otro para transportar piezas por medio de ruedas.
- **Zoomórficos:** Estos robots pretenden imitar el movimiento animal y son utilizados recientemente para el estudio de volcanes y exploración espacial.
- **Poliarticulados:** Su utilidad es principalmente en las industrias para desplazar elementos que requieren extremo cuidado. Tienen muy pocos grados de libertad.
- **Androides:** Estos robots imitan de una manera muy limitada la apariencia y movimiento del ser humano. Su función en la actualidad es mera experimentación.

La robótica en la actualidad ha evolucionado y se cuenta con una amplia información teórica. Sin embargo, no se ha logrado a la perfección tareas que para los seres humanos son fáciles de

realizar como caminar, correr e identificar objetos, en especial en el campo de la robótica autónoma. Aun así, se espera que con el avance de la tecnología en las computadoras e investigaciones en la inteligencia artificial y visión artificial se acerque cada vez más al sueño de tener una máquina que emule el comportamiento de un ser humano, por ejemplo la figura 2.1 muestra a ASIMO, el robot humanoide más avanzado que existe hoy en día.



Fig. 2.1 Robot ASIMO de Honda.

Se dice que en el futuro, los robots podrán ser capaces de convivir con los seres humanos, estando en nuestros hogares con un aspecto humanoide, realizando las tareas cotidianas sin que éstos afecten la vida del ser humano.

2.3 IMPORTANCIA DE LOS ROBOTS MÓVILES

Los robots móviles son utilizados en una gran diversidad de tareas hoy en día. Éstos pueden ser teleoperados o autónomos, y pueden cumplir tareas en industrias y en el hogar. Gracias a que se pueden desplazar de una manera fácil y rápida, en comparación a los robots antropomórficos actuales, es posible explorar áreas de una manera más eficiente. Se utilizan principalmente para exploraciones que son peligrosas para un ser humano como el de detectar minas en un campo minado. Regularmente, estos robots se utilizan en superficies que no presentan obstáculos complicados, ya que sus extremidades siempre se mantienen en el mismo plano. En la figura 2.2 podemos ver un ejemplo de uno de éstos.

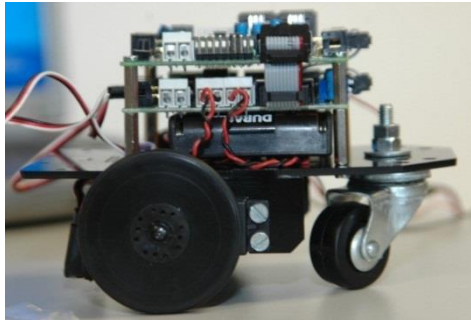


Fig. 2.2 Robot móvil.

Últimamente se han programado distintas tareas para este tipo de robots. Un robot que se utilizan en ambientes caseros es el robot aspirador [1]. Éste se encarga de trazar un área de trabajo en un cuarto, recogiendo el polvo. Como este claro ejemplo, en la actualidad se buscan mejores y nuevas ideas para realizar tareas comunes como ésta.

2.4 LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL

La locomoción en el contexto de la robótica móvil se refiere a la forma en que el robot se traslada de un punto a otro [11]. La Tabla 2.1 muestra las ventajas y desventajas de los diferentes mecanismos más usados para la locomoción de un robot en una superficie sólida: las ruedas, orugas y las patas.

	Ruedas	Orugas	Patas
Facilidad de construcción	✓	✓	
Mayor capacidad de carga	✓		
Menor susceptibilidad a daños	✓	✓	
Algoritmos sencillo de Control	✓	✓	
Disminución del deslizamiento al avanzar y girar	✓		
Superación de obstáculos en terrenos irregulares		✓	✓

Tabla 2.1 Comparación de sistemas de locomoción

Podemos concluir que para un sistema donde la superficie es regular y la navegación se basa en el conocimiento del punto donde se encuentra el robot, es preferible usar ruedas ya que acumulan menos errores que las cadenas y, a diferencia de las patas, los algoritmos de control

son más sencillos; aunado a esto, la construcción del robot es menos costosa respecto a un robot con patas.

Existen diferentes plataformas móviles con el uso de ruedas:

- Diferencial
- Sincronizada
- Triciclo
- Coche
- Ruedas omnidireccionales.

2.4.1 Diferencial

El diferencial es un diseño sencillo que permite a un robot girar en su propio eje, ir en línea recta y trazar curvas. Una arquitectura de diferencial simple consta de dos llantas en paralelo de cada lado, provistas cada una de un motor, y una o más llantas pivote al frente que ayudan a soportar el peso pero no tienen un rol activo en el direccionamiento del robot [12].

El problema principal de este tipo de diseño es que, dado que los motores son independientes, frecuentemente las velocidades de los motores varían por ello: es difícil conseguir que el robot vaya recto; inclusive si se calibran las velocidades de los motores dado que cada rueda puede encontrar distintas resistencias en el ambiente esto puede provocar que el robot se desvíe de la trayectoria planeada.

En el diseño diferencial existe una variante que consiste en el uso de dos piezas llamadas diferenciales, el diseño se denomina diferencial dual [12]. El diseño utiliza un motor para ir hacia delante y hacia atrás, y otro para los giros; con esto se resuelve la diferencia de potencias de los dos motores y minimiza el problema de seguir una línea recta.

2.4.2 Sincronizada

En este tipo de diseño las ruedas son de dirección y motrices, de tal forma que apuntan a la misma dirección. Cuando el robot cambia de dirección, gira todas sus ruedas en un eje vertical de tal forma que la dirección del robot cambia aunque el chasis siga apuntando hacia la misma dirección que tenía [13]. El principal problema de este diseño es el cambio de la orientación del chasis, para ello se debe de tener un procedimiento que permita orientarlo hacia la dirección deseada. Aunque este diseño disminuye los problemas sobre el desvío de la trayectoria programada, implica una construcción mecánica más complicada si se desea orientar los sensores hacia un punto en particular.

2.4.3 Coche

El diseño de coche es que actualmente utilizan los automóviles, consiste en cuatro ruedas dos llantas de manejo y dos de dirección [12]. Las principales desventajas de este sistema es que no puede dar vueltas en lugares reducidos y tampoco en su propio eje. La ventaja de este modelo es la facilidad de viajar en línea recta y su estabilidad en terrenos irregulares.

2.4.4 Triciclo

Este diseño es muy parecido al del coche con la diferencia de que tiene sólo una rueda de dirección, en ambos modelos las ruedas direccionales no son motrices [13]. La ventaja principal de este diseño es que puede realizar giros en espacios más cortos que en el diseño de coche. Su construcción mecánica es más sencilla ya que sólo se construye una rueda de dirección en vez de dos.

2.5 LOCALIZACIÓN, EXPLORACIÓN Y GENERACIÓN DE MAPAS EN LA ROBÓTICA MÓVIL

Debido a la posibilidad de desplazamiento, la robótica móvil requiere la solución de tres tareas principales para efectuar tareas de una manera eficiente: el aprendizaje y uso de mapas, la localización y la planificación de trayectorias. En [14] Makarenko et al. Definen estas tareas de la siguiente manera:

El aprendizaje y uso de mapas pretende responder a la pregunta ¿cómo se ve el mundo?, que consiste en la correcta interpretación de la información obtenida por los sensores del robot y la generación de una representación del mundo (mapa) que sea explotable por el robot.

El problema de la localización aborda la pregunta ¿dónde estoy? para estimar la posición actual del robot relativa a un mapa dado, teniendo como fuentes de información los datos obtenidos por los sensores y las lecturas de odometría. Existen dos tipos de localización: a) localización global que determina la posición del robot sin tomar en cuenta su posición inicial y b) la localización local donde se conoce la posición inicial y se realiza un seguimiento de los movimientos del robot para estimar la posición actual del robot.

La planificación de trayectorias trata de resolver el problema de ¿cómo llegar al destino de manera eficiente?. Uno de los principales objetivos de la robótica móvil es el desplazamiento autónomo de los robots, es decir, la capacidad de moverse de un punto a otro, evitando las colisiones con los posibles obstáculos que se presenten. Para alcanzar este objetivo existen dos tipos de navegación: la navegación local y la navegación global. La navegación local consiste en llevar al robot desde un punto a otro sin considerar un conocimiento previo del mundo, planificando los movimientos de acuerdo a la información local proporcionada por los sensores. Este tipo de navegación suele dar resultados fuera del óptimo (distancia recorrida, energía empleada, tiempo). La navegación global trata de llevar al robot de un punto a otro tomando en cuenta un conocimiento previo del mundo, por lo cual se debe contar con un mapa global del escenario a partir del cual se calcula una trayectoria óptima entre el destino y la posición del robot. Es importante hacer notar que existen aplicaciones donde no es posible

contar con información previa sobre el medio ambiente (típicamente, todas las aplicaciones de exploración).

2.5.1 Localización

La estimación de la localización de un vehículo móvil le permite al sistema de control conocer el punto en el que se encuentra dentro del entorno y por lo tanto poder decidir el camino que deberá recorrer para alcanzar el punto de destino.

Los métodos desarrollados para la localización se pueden considerar agrupados según tres tendencias [3]:

- Medidas Internas
- Percepción del Entorno
- Estaciones de Transmisión

La tabla 2.2 muestra las técnicas y métodos que se usan para la localización de los robots móviles durante la exploración o navegación en un ambiente.

Técnicas	Métodos
Medidas Internas	<ul style="list-style-type: none">• Odometría• Navegación Inercial
Estaciones de Transmisión	<ul style="list-style-type: none">• Estaciones Fijas• Estaciones Móviles
Marcas en el Entorno	<ul style="list-style-type: none">• Marcas Artificiales• Marcas Naturales

Tabla 2.2 Técnicas de Localización.

Localización basada en medidas internas

La forma más simple de estimar la posición y orientación de un robot móvil consiste en integrar la trayectoria recorrida por éste a partir de una serie de medidas internas: vueltas dadas por las

ruedas, velocidades, aceleraciones, cambios de dirección y sentido, etc. [5] En función de la información empleada pueden distinguirse dos grupos:

Sistemas Odométricos. La odometría tiene por objetivo estimar la posición y orientación de un vehículo a partir del número de vueltas dadas por sus ruedas. La idea fundamental de la odometría es la integración temporal del movimiento, lo cual lleva inevitablemente a la acumulación de errores. La ventaja de la odometría reside en su simplicidad, bajo costo y en que permite muy altas tasas de muestreo. Sin embargo, además de necesitar una calibración debido al desgaste de las ruedas, ésta técnica es vulnerable a las imprecisiones originadas por el deslizamiento de las ruedas, las irregularidades del terreno y las variaciones en la carga transportada. [4]

Navegación Inercial. Los sistemas de navegación inercial estiman la posición y orientación del vehículo empleando medidas de las aceleraciones y ángulos de orientación. Los acelerómetros suelen estar basados en sistemas pendulares. La primera integración de las aceleraciones proporciona la velocidad y la segunda la posición. La precisión del acelerómetro resulta crítica debido a la doble integración de las aceleraciones, ya que pequeños errores cometidos por éste repercuten notablemente en la posición estimada. La estimación de la posición se complica más aún cuando la relación señal/ruido es también pequeña debido a que las aceleraciones también son pequeñas. [7]

Localización basada en estaciones de transmisión

Este tipo de sistemas de posicionamiento absoluto, también conocidos como balizas de radiofrecuencia (RF) [8]. La ventaja de ésta técnica consiste en proporcionar la localización absoluta del vehículo en un área suficientemente grande sin requerir estructuración alguna del entorno. Éstas características hacen, a éstos sistemas, especialmente adecuados para ser empleados en aplicaciones donde el vehículo ha de moverse en entornos muy diversos y donde debe recorrer grandes distancias.

La configuración de estos sistemas está basada en un receptor (o un transceptor) a bordo del vehículo y un conjunto de estaciones transmisoras de RF ubicadas en lugares conocidos distantes del vehículo.

Estaciones fijas. Los sistemas de posicionamiento mediante estaciones fijas son básicamente de dos tipos:

Triangulación: Conocidos como métodos de navegación hiperbólica o pasivos. Éste método fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial y la implementación original se denominó LORAN (del inglés Long Range Navigation) navegación de largo alcance [6]. Este sistema compara los tiempos de llegada de dos señales idénticas transmitidas simultáneamente desde transmisores de alta potencia localizados en sitios de coordenadas conocidas como se muestra en la figura 2.3.

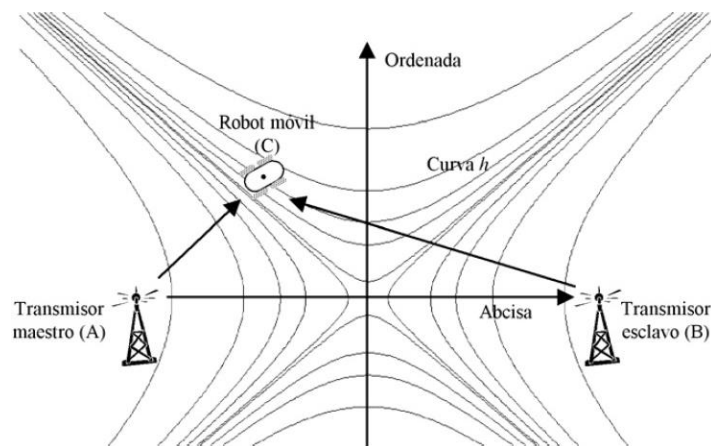


Fig. 2.3 Método de Triangulación.

Trilateración: Conocidos como sistemas activos. Éstos miden el retardo de propagación para un número de transceptores localizados en lugares de coordenadas conocidas como se muestra en la Figura 2.3. Los sistemas activos cubren desde los 100 m. hasta casi los 100 Km con una exactitud de 2 m.

El sistema opera de la siguiente manera: El transceptor móvil emite una señal de identificación que es captada por varios transceptores fijos, que la devuelven adicionando su propio código de identificación. El retardo que existe entre el instante en que el robot móvil

emite la señal y el instante en que recibe la respuesta de las estaciones fijas determina la distancia que separa al robot de las estaciones fijas. Son necesarias al menos tres estaciones fijas para evitar ambigüedades en la localización del robot móvil

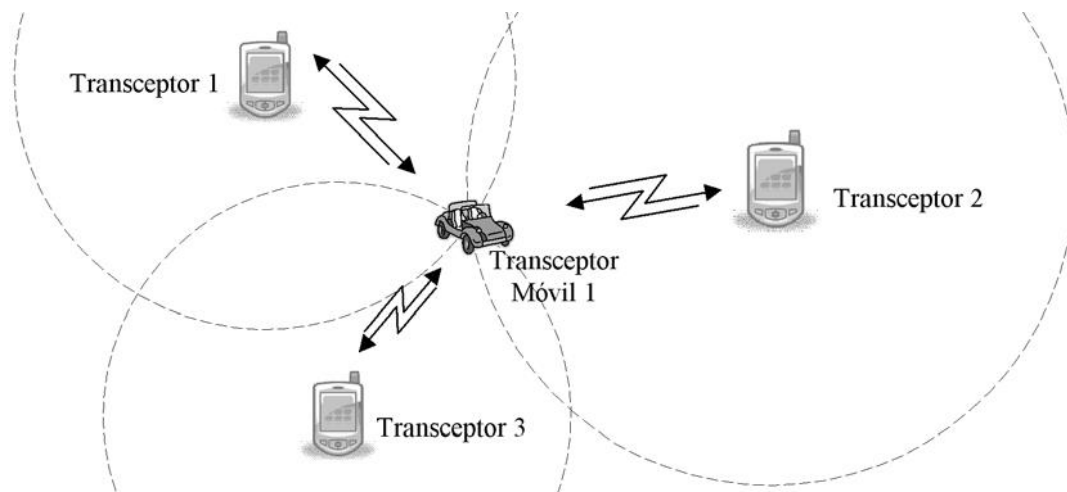


Fig. 2.3 Método de Trilateración.

Los esquemas de trilaterización ultrasónicas ofrecen una exactitud aceptable y son una solución de bajo costo al problema del posicionamiento de robots móviles. Debido al alcance relativamente corto del ultrasonido, estos sistemas son adecuados para operar en pequeñas áreas de trabajo y sólo si no existen obstáculos significativos que interfieran con la propagación de la señal.

Estaciones móviles. Los sistemas de posicionamiento mediante estaciones móviles operando desde satélites son hoy en día los de mayor interés para robots móviles [7]. El primer sistema de posicionamiento mediante satélites está basado en el cambio de frecuencia experimentado por las señales de radio transmitidas por éstos, conocido como Efecto Doppler. En la actualidad éste sistema ha sido reemplazado por uno mucho más potente denominado GPS (Global Positioning System) cuya estructura se muestra en la Figura 2.4.

El GPS (su nombre correcto es NAVSTAR-GPS) emplea una constelación de 24 satélites (incluyendo tres de reserva) orbitando la tierra cada 12 horas a una altura de 20.200 Km. aproximadamente. Cuatro satélites son colocados en cada una de seis órbitas cuyos planos están

separados 55° a partir del plano del Ecuador. Cada uno de ellos transmite dos señales de radio en alta frecuencia, moduladas por un pseudo-ruido binario en las que se codifican en forma compleja información sobre el instante en que la señal fue transmitida e información orbital entre otras cosas. Empleando al menos tres satélites, el receptor calcula por trilaterización la altitud, latitud y longitud del vehículo de forma “instantánea y continua” (tiempos entre 30 y 60 nseg.). También puede determinar la velocidad a partir del desplazamiento en frecuencias mediante el efecto Doppler.

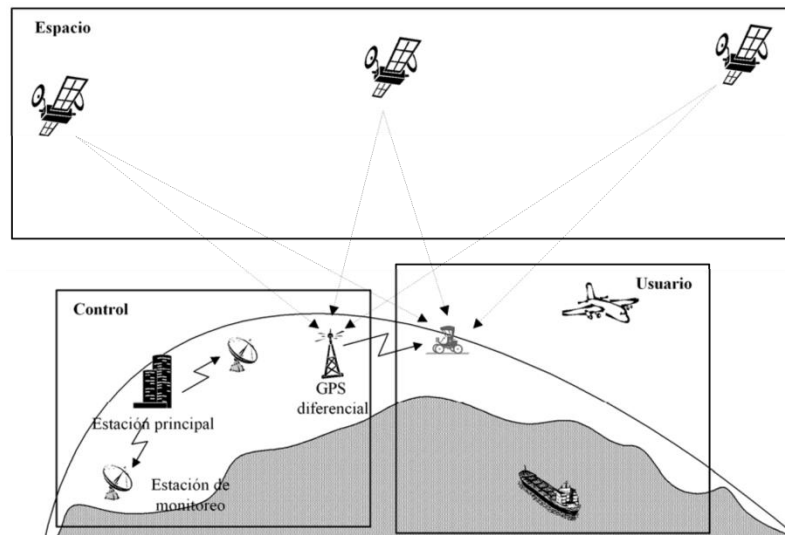


Fig. 2.4 Técnica de Estaciones Móviles

Localización basada en marcas en el entorno

Los estimadores basados en la percepción del entorno emplean sensores que suministran información sobre éste a partir de la cual se infiere la localización del robot móvil mediante comparación de esta información con otros datos o modelo conocido del entorno [4].

Los sensores empleados en este tipo de estimadores pueden clasificarse en dos grupos:

Sensores activos: Son aquellos que emiten algún tipo de energía al medio (por ejemplo : luz o ultrasonidos). Éstos proporcionan directamente medidas de distancias al entorno. Entre los sistemas más empleados se encuentran los sonares (sensores de ultrasonido) y los scanners (sensores láser).

Sensores pasivos: Se limitan a captar la energía existente en el medio. Entre los sistemas más empleados se encuentran las cámaras de vídeo y los sensores infrarrojos.

En general las marcas (también conocidas como mojones o balizas especiales) son características del entorno de operación que un robot puede reconocer desde sus entradas sensoriales. Aunque puede entenderse que este proceso conlleva la percepción del entorno, la posición no se estima a partir del análisis ó interpretación del entorno percibido, sino que es determinado de una forma más o menos directa en base al principio de triangulación, bien a partir de medidas de distancias, de ángulos ó combinaciones de los dos.

Las marcas naturales son aquellos objetos o características propios del ambiente y que tienen una función distinta a la de facilitar la navegación del robot. El principal problema en el posicionamiento mediante marcas naturales es poder detectar y extraer características distintivas del entorno de trabajo a partir de la forma en que se haya estructurado éste. El sistema sensorial por excelencia es la visión computarizada. La mayoría de los sistemas de visión empleados en la navegación mediante marcas naturales tratan de identificar segmentos verticales de longitud apreciable como son los marcos de una puerta, la intersección de paredes u objetos característicos como las fuentes de luz en el cielo raso. Sin embargo, la visión computarizada es un área demasiado amplia y diversa para poder resumirla en unas pocas líneas y sólo se hace referencia a ella en forma superficial.

Las marcas artificiales, éstas son formas geométricas (rectángulos, líneas, círculos, etc.) que, además, pueden incluir información adicional (por ejemplo, en forma de código de barras), tienen una posición fija conocida en relación a la cual el robot móvil puede estimar su posición y su único propósito es facilitar la navegación de éste

Es necesario que el robot móvil conozca las marcas y su posición dentro del área de trabajo. Con el objeto de simplificar el problema de la interpretación de las marcas se considera que la posición y orientación actual del vehículo son conocidas aproximadamente, tal que el robot sólo necesita observar y comparar la información de las marcas en un área limitada. El procedimiento general para la estima de la posición en función de marcas se muestra en la Figura 2.5.

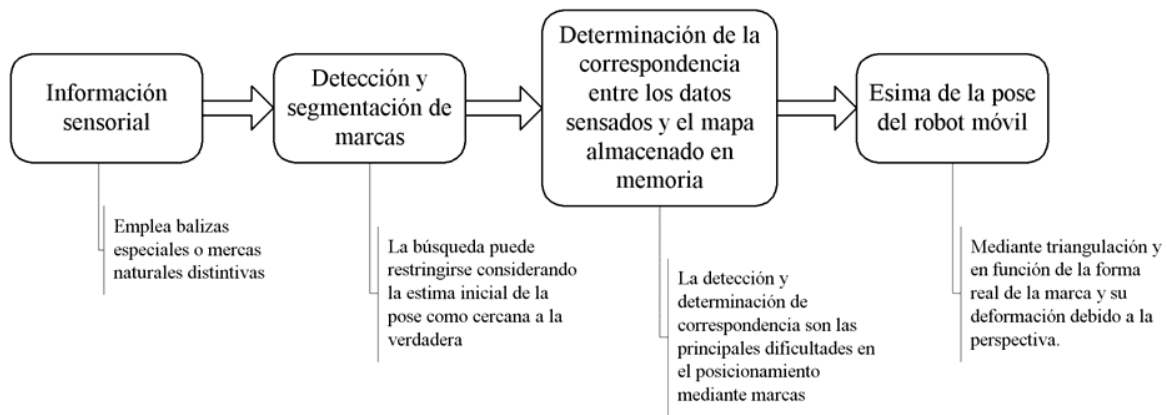


Fig. 2.5 Técnica de Posicionamiento por Marcas.

2.5.2 Exploración

Realizar una tarea de exploración para un robot móvil significa recorrer un camino que lo conduzca desde una posición inicial hasta otra final, pasando por ciertas posiciones intermedias o submetas. El problema de la exploración se divide en las siguientes cuatro etapas:

Percepción del mundo: Mediante el uso de sensores externos, creación de un mapa o modelo del entorno donde se desarrollará la tarea de navegación [9].

Planificación de la ruta: Crea una secuencia ordenada de objetivos o submetas que deben ser alcanzadas por el vehículo. Esta secuencia se calcula utilizando el modelo o mapa de entorno, la descripción de la tarea que debe realizar y algún tipo de procedimiento estratégico.

Generación del camino: En primer lugar define una función continua que interpola la secuencia de objetivos construida por el planificador. Posteriormente procede a la discretización de la misma a fin de generar el camino.

Seguimiento del camino: Efectúa el desplazamiento del vehículo, según el camino generado mediante el adecuado control de los actuadores del vehículo [10].

Estas tareas pueden llevarse a cabo de forma separada, aunque en el orden especificado. La interrelación existente entre cada una de estas tareas conforma la estructura de control de navegación básica en un robot móvil [35] y se muestra en la figura 2.6.

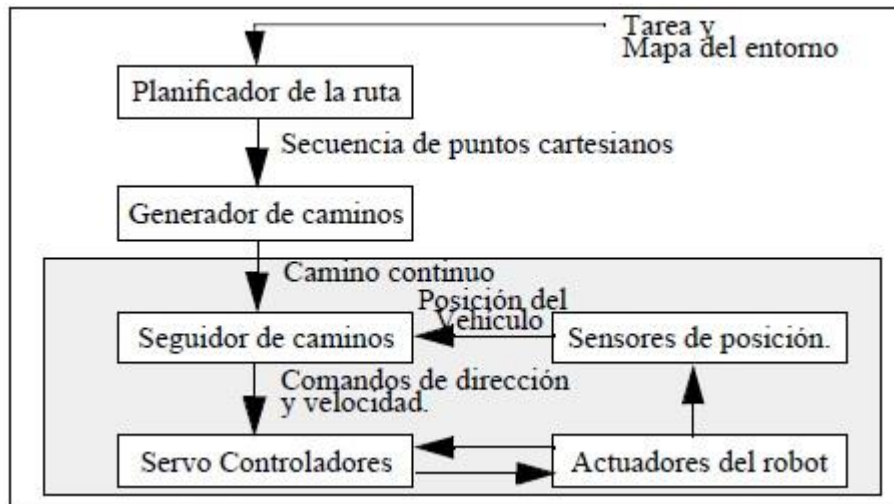


Fig. 2.6 Estructura de Exploración.

Algoritmo de Dijkstra

Este algoritmo tiene muchas aplicaciones por ejemplo en comunicaciones por internet, permitiendo que los paquetes lleguen de forma más rápida, es usado en todos aquellos sistemas que nos indican las rutas más cortas entre dos puntos (GPS, Google Maps, etc.). Fue descrito por Edsger Dijkstra en 1959.

El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo eficiente (de complejidad $O(n^2)$ donde n es el número de vértices) que sirve para encontrar el camino de coste mínimo desde un nodo origen a todos los demás nodos del grafo [37].

Dado un grafo a cuyos arcos se han asociado una serie de pesos, se define el camino de coste mínimo de un vértice u a otro v , como el camino donde la suma de los pesos de los arcos que lo forman es la más baja entre las de todos los caminos posibles de u a v .

Este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con aristas de costo negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo).

Método de Campo de Potencial.

En este método se parte de un escenario donde el espacio de configuraciones se encuentra dividido en porciones discretas estableciendo una rejilla regular. A cada casilla se le concede un valor de potencial dependiendo de su proximidad a un obstáculo o la cercanía a los puntos origen o destino. El planificador genera una trayectoria a un vector gradiente derivado del campo potencial [37].

Esta técnica permite que el sistema siga siempre la dirección que minimiza el valor del campo potencial. El objetivo es alcanzar el mínimo absoluto que estará situado en la configuración destino. Sin embargo, el campo resultante puede tener una serie de mínimos locales, superiores siempre al mínimo absoluto. El problema aparece cuando el sistema alcanza un mínimo local. En este caso, el potencial no es nulo, pero el gradiente mantiene al sistema en la configuración alcanzada.

Para resolver este inconveniente se recurre a un método de generación aleatoria. Se planifican movimientos aleatorios que permitan que el sistema abandone el mínimo y a continuación, se aplica de nuevo el método del gradiente. Este proceso continuará [37] Hasta hallar un nuevo mínimo.

El modo de generar caminos consistía en crear una sucesión de desplazamientos aleatorios. En estos, cada coordenada podría experimentar un incremento positivo o negativo de una longitud constante dada. Seguidamente, se comprobaba la existencia o no de colisión y en

función de ello se agregaban al camino. Este proceso se repetirá durante un determinado número de iteraciones y a partir del último punto, se regresa al algoritmo de campo de potencial original.

El camino generado debe ser lo suficientemente largo como para abandonar cualquier mínimo local. No obstante es deseable que dicho camino no sea excesivamente largo, para evitar costes computacionales innecesarios. Por tanto, el método utilizado determinaba también un tamaño aleatorio para la longitud del camino de salida. De este modo se mantenía la capacidad de escape de cualquier mínimo, al tiempo que se proporcionaba mayor probabilidad a las longitudes menores. Estos métodos utilizan una distribución de Laplace, por ser de máxima entropía para la selección aleatoria de las magnitudes [37].

2.5.3 Reconstrucción de Mapas

Mapa es cualquier tipo de representación del entorno. A partir de un mapa, se puede determinar un camino apropiado entre dos puntos deseados, lo cual será más o menos complejo según haya sido la representación escogida [36]. Los tipos de mapas que se usan normalmente están basados en información sensorial y son de dos tipos:

Mapas de marcas en el terreno (landmarks): Son localizaciones particulares fácilmente identificables por el sistema sensorial del robot (cierta esquina, un grupo de objetos bien visibles o tubos de neón, etc.) que actúan como marcas relevantes (landmarks). Se representan como nodos de un grafo (que pueden tener características asociadas, para garantizar su identificación unívoca), los cuales se unen por los arcos que normalmente representan la accesibilidad (si existe arco entre dos nodos, el robot puede desplazarse directamente de uno a otro de los landmarks a los que los nodos representan). Estos arcos pueden también estar etiquetados con características del recorrido como distancia, dirección, tiempo de tránsito, etc.

Mapas de ocupación: se basan en representar el terreno como una retícula, regular o no, cada una de cuyas casillas contiene un valor útil para el robot, que suele ser la certitud de ocupación, es decir, qué grado de creencia tiene el robot sobre el estado de una determinada casilla, desde -1 (es seguro que está libre) hasta +1 (es seguro que está ocupada) pasando por 0 (no hay evidencia en ningún sentido). Estos mapas se pueden construir por métodos visuales, mediante

la toma de imágenes por un par estéreo de cámaras (o una sola que va a bordo del robot y se sitúa en varias posiciones), a partir de las proyecciones de puntos límite de un objeto, como se ve en la siguiente figura 2.7:

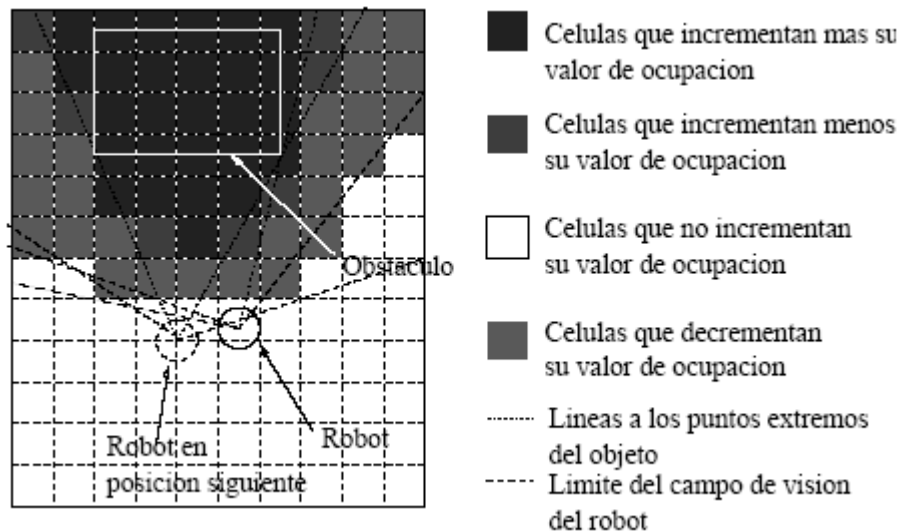


Fig. 2.7 Construcción visual de un mapa de ocupación.

Los mapas también se pueden clasificar de acuerdo a lo que almacenan:

Mapas de espacio libre: al igual que en los mapas de marcas, la estructura de almacenamiento elegida es también el grafo, pero esta vez cada nodo representa un punto de parada donde el robot pueda detenerse para explorar el entorno mediante sus sensores. Los arcos son líneas rectas que el robot pueda recorrer entre estos puntos sin encontrar obstáculos; evidentemente, limitarán a los posibles obstáculos, estos tipos de mapas se pueden ver en la figura 2.8.

Mapas de objetos: Como su nombre indica, lo que se almacena en ellos son los objetos (obstáculos) que el robot puede encontrar en su trayectoria, de varios modos; los más normales son considerar al objeto como un polígono, y almacenar su punto central y la extensión máxima en una serie de direcciones desde él; otro modo es caracterizarlo como una de entre un conjunto de figuras geométricas dadas, y dar su posición y la orientación de un eje propio de esa figura.

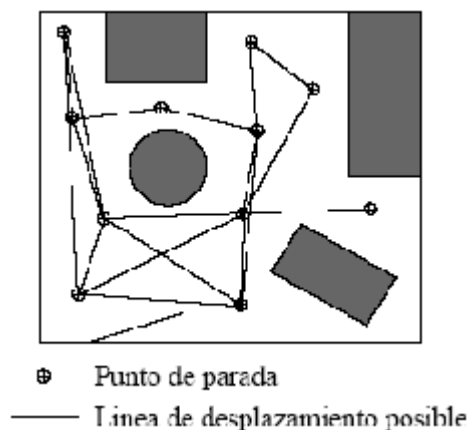


Fig. 2.8 Mapa de Espacios Libres

Mapas compuestos: almacenan tanto información de objetos como de espacio libre. Una posibilidad es dividir el espacio en regiones arbitrarias, pero conocidas, e indicar en cada una de ellas si está totalmente libre, totalmente ocupada, o parcialmente ocupada. Otra alternativa es una retícula de puntos con un indicador de estado en cada punto, y una lista de a cuáles de los puntos adyacentes se puede acceder directamente; la retícula puede hacerse más o menos densa, en función del tamaño del robot.

Quadrees: Dividen el espacio mediante una retícula, y proceden por subdivisión recursiva de la misma, mientras la celda resultante sea subdivisible, siendo el criterio el que no tenga toda ella el mismo carácter de ocupación.

2.6 SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Un sistema distribuido se define como una colección de computadores autónomos conectados por una red, y con el software distribuido adecuado para que el sistema sea visto por los usuarios como una única entidad capaz de proporcionar facilidades de computación. [15]

El desarrollo de los sistemas distribuidos vino de la mano de las redes locales de alta velocidad a principios de 1970. Más recientemente, la disponibilidad de computadoras personales de altas prestaciones, estaciones de trabajo y ordenadores servidores ha resultado en un mayor desplazamiento hacia los sistemas distribuidos en detrimento de los ordenadores centralizados

multiusuario. Esta tendencia se ha acelerado por el desarrollo de software para sistemas distribuidos, diseñado para soportar el desarrollo de aplicaciones distribuidas. Este software permite a los ordenadores coordinar sus actividades y compartir los recursos del sistema - hardware, software y datos

Los sistemas distribuidos se implementan en diversas plataformas hardware, desde unas pocas estaciones de trabajo conectadas por una red de área local, hasta Internet, una colección de redes de área local y de área extensa interconectados, que enlazan millones de ordenadores.

Las aplicaciones de los sistemas distribuidos varían desde la provisión de capacidad de cómputo a grupos de usuarios, hasta sistemas bancarios, comunicaciones multimedia y abarcan prácticamente todas las aplicaciones comerciales y técnicas de los ordenadores. Los requisitos de dichas aplicaciones incluyen un alto nivel de fiabilidad, seguridad contra interferencias externas y privacidad de la información que el sistema mantiene. Se deben proveer accesos concurrentes a bases de datos por parte de muchos usuarios, garantizar tiempos de respuesta, proveer puntos de acceso al servicio que están distribuidos geográficamente, potencial para el crecimiento del sistema para acomodar la expansión del negocio y un marco para la integración de sistemas usados por diferentes compañías y organizaciones de usuarios.

Colouris establece que son seis las características principales responsables de la utilidad de los sistemas distribuidos. Se trata de comparación de recursos, apertura (openness), concurrencia, escalabilidad, tolerancia a fallos y transparencia.

2.6.1 El Modelo Cliente Servidor

El modelo cliente-servidor de un sistema distribuido es el modelo más conocido y más ampliamente adoptado en la actualidad. Hay un conjunto de procesos servidores, cada uno actuando como un gestor de recursos para una colección de recursos de un tipo, y una colección de procesos clientes, cada uno llevando a cabo una tarea que requiere acceso a algunos recursos hardware y software compartidos. [15] Los gestores de recursos a su vez podrían necesitar acceder a recursos compartidos manejados por otros procesos, así que algunos procesos son

ambos clientes y servidores. En el modelo, cliente-servidor, todos los recursos compartidos son mantenidos y manejados por los procesos servidores. Los procesos clientes realizan peticiones a los servidores cuando necesitan acceder a algún recurso. Si la petición es válida, entonces el servidor lleva a cabo la acción requerida y envía una respuesta al proceso cliente.

El termino proceso se usa aquí en el sentido clásico de los sistemas operativos. Un proceso es un programa en ejecución. Consiste en un entorno de ejecución con al menos un teread de control.

El modelo cliente-servidor nos da un enfoque efectivo y de propósito general para la compartición de información y de recursos en los sistemas distribuidos. El modelo puede ser implementado en una gran variedad de entornos software y hardware. Las computadoras que ejecuten los programas clientes y servidores pueden ser de muchos tipos y no existe la necesidad de distinguir entre ellas; los procesos cliente y servidor pueden incluso residir en la misma máquina.

En esta visión simple del modelo cliente-servidor, cada proceso servidor podría ser visto como un proveedor centralizado de los recursos que maneja. La provisión de recursos centralizada no es deseable en los sistemas distribuidos. Es por esta razón por lo que se hace una distinción entre los servicios proporcionados a los clientes y los servidores encargados de proveer dichos servicios. Se considera un servicio como una entidad abstracta que puede ser provista por varios procesos servidores ejecutándose en computadoras separadas y cooperando vía red.

El modelo cliente-servidor se ha extendido y utilizado en los sistemas actuales con servicios manejando muchos diferentes tipos de recursos compartidos - correo electrónico y mensajes de noticias, ficheros, sincronización de relojes, almacenamiento en disco, impresoras, comunicaciones de área extensa, e incluso las interfaces gráficas de usuario. Pero no es posible que todos los recursos que existen en un sistema distribuido sean manejados y compartidos de esta manera; algunos tipos de recursos deben permanecer locales a cada computadora de cara a una mayor eficiencia - RAM, procesador, interfaz de red local -. Estos recursos clave son manejados separadamente por un sistema operativo en cada máquina; solo podrían ser compartidos entre procesos localizados en el mismo ordenador.

Aunque el modelo cliente-servidor no satisface todos los requisitos necesarios para todas las aplicaciones distribuidas, es adecuado para muchas de las aplicaciones actuales y provee una base efectiva para los sistemas operativos distribuidos de propósito general.

2.7 SISTEMAS MULTI-ROBOT

Un Sistema Multi-Robot es un grupo de robots homogéneos o heterogéneos que tienen las siguientes características [21]:

- **Cooperación:** Es la unión explícita o implícita de operaciones u acciones entre un grupo de individuos.
- **Conciencia:** Es el conocimiento que un individuo tiene de sí mismo y de su entorno.
- **Comunicación:** Es el acto de enviar o transmitir información de manera directa o indirecta a otro u otros individuos.
- **Coordinación:** Es el mecanismo mediante el cual se disponen metódicamente todos los individuos y componentes del sistema para unir esfuerzos que contribuyan a su objetivo.

Se dice que un grupo de robots es homogéneo si cada uno de ellos comparten características y capacidades similares como por ejemplo, capacidad de procesamiento y cómputo, mecanismos de comunicación, dispositivos sensoriales y de actuación etc. En caso contrario será heterogéneo.

2.7.1 Exploración Multi-Robot

En robótica móvil, el problema de exploración de ambientes desconocidos es muy popular entre la comunidad científica. Una gran variedad de propuestas para resolver este problema han sido planteadas, la mayoría de las cuales considera que sólo un robot realiza la exploración [18, 19]. En años recientes, se han desarrollado algunas propuestas para la exploración de un medio ambiente desconocido, utilizando una comunidad de robots móviles.

El objetivo principal del proceso de exploración es el de descubrir completamente un ambiente dado en el menor tiempo posible [20]. El problema de exploración multi-robot puede ser definido de la siguiente manera: considere n robots puestos en un área desconocida, equipados con sensores, un mecanismo preciso de localización y capacidad de comunicación; diseñar entonces un algoritmo de exploración eficiente para generar un mapa del área desconocida.

Sin embargo, cuando varios robots comparten un espacio de trabajo común, corren el riesgo de interferirse mutuamente. Entre más robots se utilicen para efectuar una tarea común, es mayor el tiempo empleado para evitar colisiones con otros miembros del equipo. Una técnica de exploración eficiente es aquella que busca minimizar el tiempo necesario para completar la tarea, por lo que debe considerar técnicas para distribuir los robots en el ambiente y reducir así la cantidad de redundancias sobre las áreas exploradas.

2.7.2 Taxonomía de los Sistemas Multi-Robot

El objetivo de una taxonomía o clasificación es dar claridad sobre el alcance, restricciones y complejidad de posibles diseños. Al respecto, muchos autores han propuesto diversas clasificaciones dirigidas por varios aspectos de los Sistemas Multi-Robot como por ejemplo arquitecturas, estrategias de resolución de conflictos, aprendizaje, problemas geométricos, tamaño del sistema (número de robots), topología de la comunicación, etc. [22, 23].

La taxonomía que recae en la arquitectura, la comunicación, la cooperación y la localización con se ilustra en la Tabla 2. Considerando, que estos aspectos o características son más intuitivos e identificables a la hora de proponer un diseño o categorizar un sistema multi-robot.

Característica	Categorías
Coordinación	Descentralizado Centralizado
Comunicación	Directa Indirecta

Cooperación	Eusocial Intencional
Localización	Local Global

Tabla 1. Taxonomía de los Sistemas Multi-Robot

Arquitectura.

En el contexto de la robótica, la palabra arquitectura se refiere a la organización, función e interacción de los componentes (hardware y software) que integran un robot. Al respecto, en la literatura se encuentran básicamente tres tipos de arquitecturas.

Deliberativa: El robot posee una serie de sensores y un modelo simbólico del entorno. Con base en el modelo y las condiciones del entorno medidas por los sensores, planifica la toma de decisiones (alcanzar objetivo, seguir trayectoria). Las desventajas principales son el alto requerimiento de cómputo y memoria y la dificultad de operar en un ambiente dinámico o desconocido [24]

Reactiva: El robot dispone de una serie de sensores que permiten medir características o condiciones del entorno y a partir de ellas activar comportamientos que ejecutan acciones a través de actuadores. Por lo tanto, su capacidad es responder a los estímulos del ambiente por lo que no requieren una representación de éste ni la planeación de acciones o movimientos. Esta arquitectura es denominada basada en comportamiento.

Híbrida: En los últimos años ha tenido gran acogida ya que combina la rápida respuesta de la arquitectura reactiva con la toma de decisiones basada en modelos internos de la arquitectura deliberativa [24]

La coordinación asegura que un grupo de robots actúen de una manera coherente, lo cual implica sincronización de acciones e intercambio de información entre robots (comunicación). Tanto la sincronización como la comunicación dependen fuertemente de los objetivos del sistema, las características de los robots y el ambiente en el que actúan [25]. Existen diferentes enfoques de coordinación entre los que se destacan:

Enfoque Centralizado: Existe un agente que tiene el control de todos los robots los cuales actúan como esclavos, lo cual requiere que este agente tenga un conocimiento global del entorno y un diseño preciso para considerar todos los posibles estados del sistema.

Enfoque Descentralizado: Cada uno de los robots percibe el ambiente y pueden tomar decisiones de manera autónoma sin recibir instrucciones de un superior, líder o control central. Este enfoque a su vez se divide en jerárquico y distribuido. En la coordinación jerárquica los robots trabajan diferentes niveles de abstracción de un problema. En un mismo nivel se establece una configuración distribuida, si hay más de un robot. Para resolver un problema cada robot divide el problema en sub-problemas que él puede resolver, con la cooperación de los agentes que están al mismo nivel y sub-problemas que sabe que los agentes de niveles inferiores de la jerarquía pueden resolver

Por lo tanto, un Sistema Multi-Robot puede ser categorizado respecto a la arquitectura en centralizado o descentralizado dependiendo de la estrategia de coordinación aunque esto no implica que un sistema sea totalmente centralizado o descentralizado como señala Cao [26]

Comunicación.

A través de la comunicación es posible enviar o transmitir información a otro u otros individuos. En el contexto de los Sistemas Multi-Robots esta comunicación puede ser de dos tipos:

Directa: Es la transmisión y recepción intencional de información. Esta se realiza generalmente con la ayuda de mecanismos o protocolos de comunicación como IEEE 802.11 wireless ethernet, infrarrojo, Bluetooth o Zig-bee, para lo cual se requiere hardware especial de comunicación. En lo referente a los Sistemas Multi-Robot comúnmente se usa broadcasting o unicasting para realizar la comunicación. Un robot puede usar broadcasting para anunciar su localización o estado a todo el sistema o podría usar unicasting para comunicarse exclusivamente con otro robot [27].

Indirecta: También denominada comunicación implícita, es aquella que ocurre como efecto lateral de otras acciones que generan información sin un remitente explícito. En el caso de

algunos insectos, la acción de encontrar una fuente de alimento genera la emisión de señales químicas que pueden ser percibidas por otros individuos.

Cooperación.

En la naturaleza existen básicamente dos tipos de comportamientos cooperativos: eusocial y cooperativo intencional [28]

El comportamiento eusocial presente en varias especies de insectos como termitas, abejas, avispas y hormigas está caracterizado por una clara división de tareas de tal forma que un número reducido de individuos se encarga de reproducirse mientras otros ayudan en tareas tales como la alimentación, cuidado de las crías y defensa [29]. En este tipo de conducta los individuos sacrifican su propio beneficio con el fin de garantizar la supervivencia de toda la colonia. Además dicha conducta se realiza de manera inconsciente ya que la división de tareas y roles esta preestablecida genéticamente. Una buena definición en el contexto de la inteligencia artificial se puede encontrar en [30], donde se afirma que este comportamiento es el conjunto de acciones de un agente sobre el medio de tal forma que éstas contribuyen a los objetivos de otros agentes. En resumen el comportamiento eusocial está orientado a la supervivencia del grupo en lugar de los individuos.

Por su parte, el comportamiento cooperativo también denominado cooperativo intencional está presente en algunas especies de animales vertebrados y es el resultado de interacciones entre individuos “egoístas”. Contrario al comportamiento eusocial, éste no es motivado por un beneficio conjunto sino por el deseo y la intención explícita de cooperar con el fin de maximizar el beneficio y la utilidad individual [26]

Muchos de los trabajos referentes a multi-robot han adoptado o han sido inspirados por este tipo de comportamientos. Los sistemas basados en comportamientos de tipo eusocial hacen parte de una subdisciplina de los Sistemas Multi-Robot denominada Robótica de Enjambre de la que se habla más adelante. En consecuencia, un Sistemas Multi-Robot puede ser clasificado respecto al tipo de cooperación que implemente como eusocial o cooperativo intencional.

Localización.

Es el proceso de estimar la posición de un robot dentro de un área que determina un sistema de coordenadas. Tanto en ambientes internos como externos los robots necesitan implementar alguna técnica que les permita conocer su posición con el fin de completar satisfactoriamente su objetivo

Muchas de las técnicas usadas al respecto, utilizan como fuentes de información las observaciones del ambiente o entorno a través de los sensores del robot y/o las medidas de odometría que permiten registrar los incrementos de posición del robot. Otras técnicas utilizan elementos incorporados al ambiente denominados “marcas” que permiten triangular la posición del robot. [31]. Generalmente, el problema de localización suele clasificarse en:

Localización Local: Consiste en determinar la posición del robot a través del conocimiento a priori de su posición inicial, haciendo seguimiento del movimiento del robot (traslacional y rotacional) usando odometría. Sin embargo la odometría presenta errores acumulativos clasificados como sistemáticos y no sistemáticos. Los primeros dependen de las propiedades del robot (resolución de encoders, diámetro de las llantas) mientras que los segundos dependen de las condiciones del ambiente como por ejemplo el coeficiente de fricción de la superficie de desplazamiento del robot. Para corregir dichos errores, ésta técnica se suele combinar con el uso de marcas para hacer triangulación y corregir la posición [31].

Localización Global: Permite determinar la posición del robot sin tener como referencia una posición inicial. Para lo cual se manejan hipótesis de la posición utilizando enfoques probabilísticos entre los que se destacan el análisis bayesiano, las cadenas de markov o el filtro de Kalman, entre otros.

Muchas de las técnicas de localización mencionadas requieren además, de un modelo o representación del entorno con el fin de comparar las lecturas de los sensores del robot con dicho modelo para actualizar su posición. En general, existen dos tipos de modelos del entorno: geométrico y topológico. Los modelos geométricos representan el entorno a través de sus

características geométricas como distancias, dimensiones, aristas y esquinas de los objetos que lo constituyen [32]

2.8 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Esta tecnología es, a juicio de Galo Nuño [33], la mejor en la actualidad junto con Wi-Fi para la localización en interiores, y su viabilidad ya ha sido estudiada en algunos trabajos como [34]. Sin embargo, su alcance es más reducido aún que en Wi-Fi y la señal fluctúa de igual manera cuando cambian las condiciones de la planta, o con el movimiento de personas.

La ventaja principal de esta tecnología es su bajo coste y baja potencia de emisión, pero su bajo ancho de banda hace que su utilidad sea reducida y por esta razón es posible que la localización usando Wi-Fi sea en el futuro próximo más importante que con Zig-Bee.

Hay diversas técnicas de localización que usan la tecnología 802.11; a continuación se va a describir cada una de ella:

2.8.1 ToA

La técnica ToA (Time of Arrival – Tiempo de llegada) se basa en el hecho de que una señal electromagnética tarda un tiempo en llegar de emisor a receptor. Hay una relación lineal entre tiempo de propagación y distancia recorrida, y por ello, mediante técnicas de triangulación se puede inferir la distancia entre emisor y receptor.

Adicionalmente, está la técnica DToA (Differential Time of Arrival), similar pero que hace uso de dos señales, cada una con velocidades de propagación diferentes. La primera de ellas es una señal de radio que tiene un tiempo de propagación T_R ; la segunda, en cambio, es una señal acústica cuyo tiempo de propagación se expresa como T_S . En la Figura 2.10 se muestra el cálculo de la distancia al receptor en DToA.

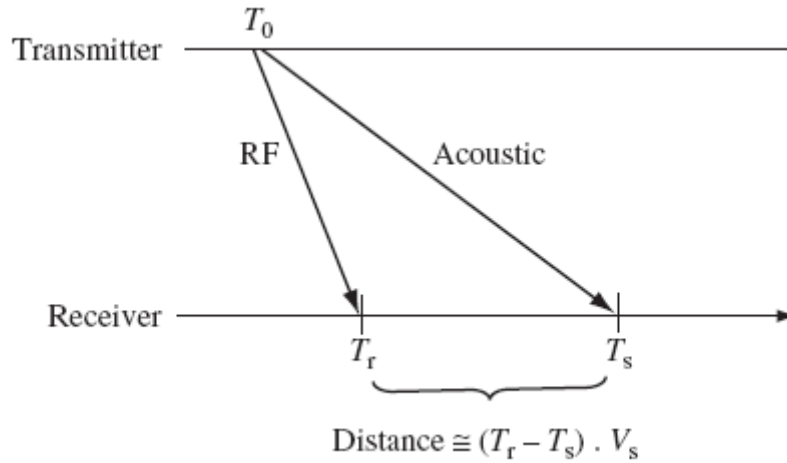


Fig. 2.10: Cálculo de la distancia entre transmisor y receptor en DToA

Como la distancia que tarda en llegar una señal de radio de un transmisor a un receptor situado a pocos metros es muy pequeña, se puede asimilar a un tiempo 0. Por ello, observaremos cuánto tiempo más ha tardado la recepción de la señal acústica, y multiplicándolo por la velocidad de propagación de la señal acústica tendremos una medida bastante correcta de la distancia.

La ventaja del DToA respecto del ToA es que al medir primero el tiempo de forma relativa frente a la medida absoluta del ToA se puede disminuir el error porque se puede usar una resolución temporal mayor.

También se puede emplear otro tipo de DToA, que compara por pares los tiempos de llegada de las señales de cada estación base (BTS), mediante el uso de hipérbolas, las cuales cumplen la condición de que la distancia a cada BTS del par sea constante. Una representación gráfica de este algoritmo se muestra en la Figura 2.11

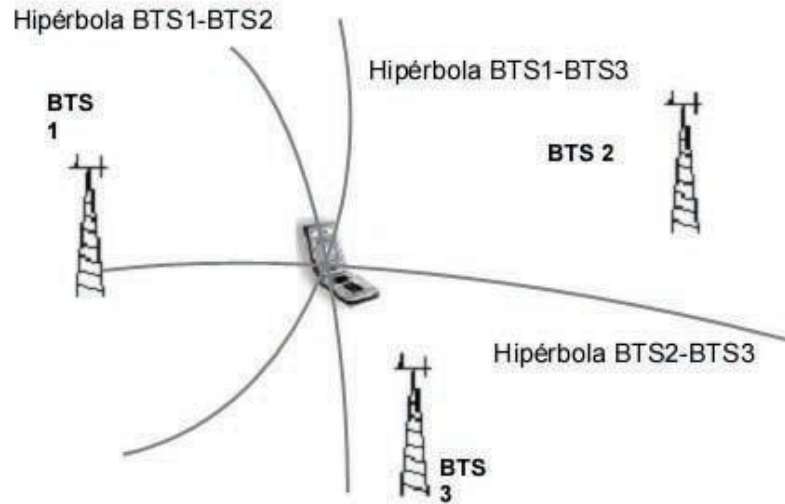


Figura 2.11: DToA por comparación por pares de estaciones base

Sin embargo, esta técnica tiene los inconvenientes típicos de la localización en interiores, y es que por el multitrayecto, el tiempo de propagación será más elevado de lo que sería en espacio libre y las mediciones de distancia no serán muy precisas. También requiere un reloj muy preciso para poder medir con variaciones temporales muy pequeñas cambios de localización importantes.

2.8.2 AoA

Las técnicas AoA (Angle of Arrival) son comunes en el procesamiento de señales con arrays. En lugar del uso de una sola antena, se despliegan varias antenas de forma que se pueda inferir el ángulo de llegada de la señal. Después de esto, la estimación de la localización se basa en la triangulación de estos ángulos. Aunque el sistema es bastante preciso, también es verdad que los dispositivos 802.11 no incluyen arrays de antenas, sino una, o como mucho dos, y por esta razón no se puede implementar un sistema de localización basado en AoA sin hardware adicional.

En realidad, la técnica del ángulo de llegada es efectiva sólo cuando no hay multitrayectos porque en caso de haberlos se puede pensar que la señal viene de otro lugar al medir el ángulo de una señal reflejada. Por ello, normalmente se necesita LoS (*Line of Sight*) para estimar el ángulo de un TM hacia una antena emisora.

Al necesitarse LoS, las técnicas AoA son más adecuadas para entornos muy despejados como pueden ser los rurales, y son muy sensibles a variaciones de orientación de la antena emisora provocadas por el viento o tormentas, porque miden el ángulo de forma absoluta. La Figura 2.12 muestra el cálculo de la localización con AoA.

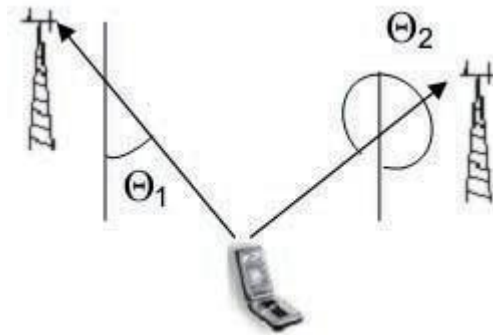


Fig.2.12: Sistema de localización por ángulo de llegada

2.8.3 RSS

Esta técnica usa la atenuación de la señal recibida para inferir la localización del terminal móvil. En base a esta atenuación se puede estimar la distancia que separa al TM de cada punto de acceso, pero la relación distancia / potencia de señal recibida no es muy clara al haber multirayecto, reflexiones, difracciones, etc. como ya se ha explicado anteriormente. Sin embargo, ésta es la solución que se ha elegido por ser la más simple conceptualmente y la más barata de las tres, al no necesitar ningún hardware adicional. En caso de haber elegido hacer una localización tipo ToA se tendría que dotar de un reloj muy preciso a los dispositivos, y en el caso de AoA se debería disponer de muchas antenas en cada transmisor.

Además del inconveniente fundamental ya explicado, también hay desafíos adicionales, como la construcción de un mapa radio lo más fiable como sea posible o la variabilidad de la RSS en función del uso de distintos tipos de antenas, fabricantes, o incluso del nivel de carga de la batería del dispositivo.

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Robot Móvil – Tipo Diferencial.

La configuración diferencial está compuesta por dos ruedas situadas opuestamente en un eje perpendicular a la dirección del robot, cada rueda tiene ir conectada a un motor, las vueltas se realizan aplicando diferentes velocidades a los motores [A] Con estas dos ruedas es imposible mantener la horizontalidad del robot, es po eso que se usan ruedas locas (se mueven libremente), estas no van conectadas a ningún motor, sus movimientos se llevan a cabo dependiendo de la velocidad del robot; de acuerdo a las necesidades del mismo se pueden colocar una o más ruedas locas.

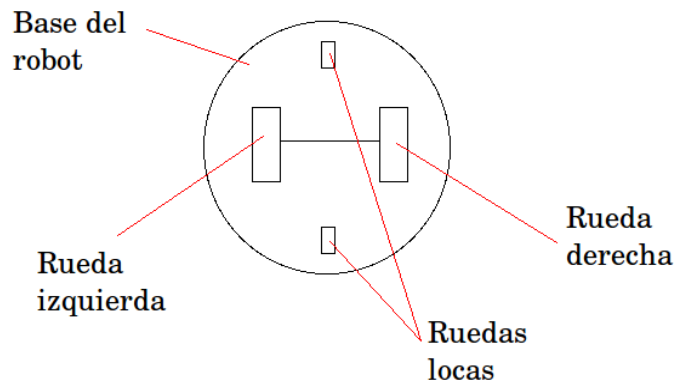


Fig.3.1 Configuración Diferencial

En este proyecto se simuló un robot diferencial con las siguientes características:

- ✓ Vueltas de 90 grados hacia la izquierda y hacia la derecha,
- ✓ El robot solo debe recorrer caminos ortogonales
- ✓ Simulación de un sensor de proximidad que detecta un obstáculo a una distancia de 5 cm.

3.2 Taxonomía del Sistema MultiRobot

Es de vital importancia contar con una taxonomía del sistema multi robot con el objetivo de tener claro el alcance, restricciones y complejidad de posibles diseños. Para la mayoría de los autores existen muchos parámetros para clasificar un sistema multirobot pero las más usadas son [8]:

- ✓ Arquitecturas
- ✓ Sistema de Aprendizaje o de toma de decisiones
- ✓ Numero de Robots
- ✓ Estructura de comunicación
- ✓ Tipo de Comportamiento y de Cooperación en la solución de problemas.

En nuestro caso nos enfocamos a 4 aspectos que son la *coordinación*, *cooperación*, *comunicación* y *localización*.

La coordinación garantiza que un sistema multirobot trabajara de forma organizada; entre mas organizado sea el sistema multirobot menos fluido de comunicación se necesita, es decir cada robot tendrá mayor autonomía y no tiene que tener una sincronización recurrente. Tanto la sincronización como la comunicación dependen fuertemente de los objetivos del sistema, las características de los robots y el ambiente en el que se desenvuelven; en este proyecto se usa el sistema descentralizado.

- ✓ *Descentralizado*: Cada uno de los robots perciben el ambiente y pueden tomar decisiones de manera autónoma sin recibir instrucciones de un superior, líder o control central. Este enfoque a su vez se divide en jerárquico y distribuido. En la coordinación jerárquica los robots trabajan diferentes niveles de abstracción de un problema. En un mismo nivel se establece una configuración distribuida, si hay más de un robot. Para resolver un problema cada robot divide el problema en sub-problemas que él puede resolver.

Comunicación. A través de la comunicación es posible enviar o transmitir información a otro u otros individuos, para este proyecto se usó una comunicación directa.

- ✓ *Directa:* Es la transmisión y recepción intencional de información. Esta se realiza generalmente con la ayuda de mecanismos o protocolos de comunicación como IEEE 802.11 wireless ethernet, infrarojo o Bluetooth, para lo cual se requiere hardware especial de comunicación. En lo referente a los Sistemas MultiRobot comúnmente se usa broadcasting o unicasting para realizar la comunicación. Un robot puede usar broadcasting para anunciar su localización o estado a todo el sistema o podría usar unicasting para comunicarse exclusivamente con otro robot.

Cooperación. En la naturaleza existen básicamente dos tipos de comportamientos cooperativos: eusocial y cooperativo aquí se usó el cooperativo.

- ✓ *El cooperativo:* también denominado cooperativo intencional está presente en algunas especies de animales vertebrados y es el resultado de interacciones entre individuos “egoístas”. Contrario al comportamiento eusocial, éste no es motivado por un beneficio conjunto sino por el deseo y la intención explícita de cooperar con el fin de maximizar el beneficio y la utilidad individual.

La localización que se usó fue la local.

1. *Localización Local:* Consiste en determinar la posición del robot a través del conocimiento a priori de su posición inicial, haciendo seguimiento del movimiento del robot (traslacional y rotacional) usando odometría. Sin embargo la odometría presenta errores acumulativos clasificados como sistemáticos y no sistemáticos. Los primeros dependen de las propiedades del robot (resolución de encoders, diámetro de las llantas) mientras que los segundos dependen de las condiciones del ambiente como por ejemplo el coeficiente de fricción de la superficie de desplazamiento del robot. Para corregir dichos errores, esta técnica se suele combinar con el uso de marcas para hacer triangulación y corregir la posición.

En este proyecto se usa la siguiente configuración:

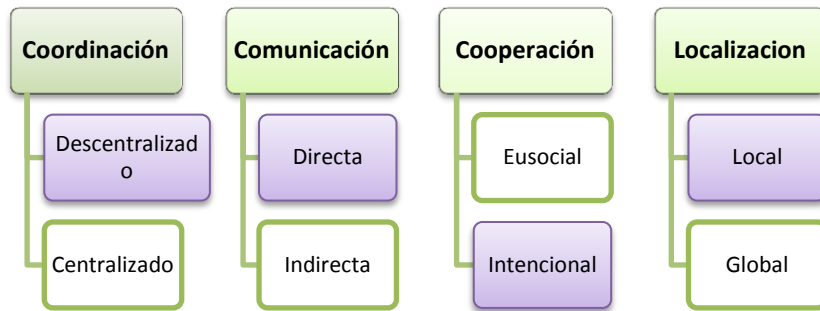


Fig.3.2 Diagrama de Taxonomía usada en el proyecto

3.3 Sistema de Comunicación con Xbee

Las antenas Xbee son las más usadas por las arquitecturas de robots, un ejemplo de ellas es la arquitectura Biolod que tiene implementado un puerto Xbee pero los costos de dicho robots son elevados. Este tipo de antenas son muy usadas porque utilizan una comunicación inalámbrica de bajo consumo basa en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas personales, con una tecnología domótica.

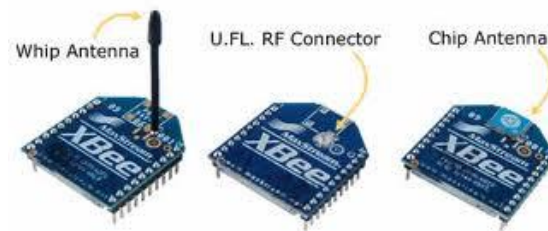


Fig.3.3 Antenas X-bee

Los módulos Xbee proveen 2 formas de comunicación la primera es la transmisión serial transparente (modo AT) y el Modo API que provee muchas ventajas; para usar estos dispositivos se tiene que configurar y también existen dos formas de hacer mediante la PC usando el programa X-CTU o desde el microcontrolador. Las arquitecturas con la que se permiten comunicar los xbee son punto a punto, punto a multi punto y Red mesh.

Para este proyecto se configuraron mediante el X-CTU se usó una estructura punto a multipunto. Por lo tanto la red quedo como se muestra en la Fig. 3.4

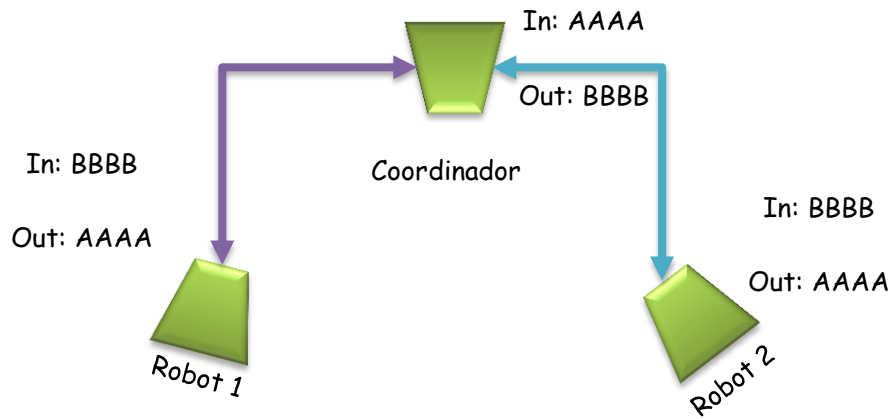


Fig.3.4 Esquema de Arquitectura de los robots

3.4 Algoritmo de Coordinación mediante mensajes.

Para este objetivo se construyó un algoritmo que tuviera una sintaxis de mensajes de tal manera que las recepción y envío de mensajes tenga un orden y se generen de forma adecuada, recordando que las antenas xbee envían datos pequeños surgió la necesidad de construir una estructura con identificadores; a la par debería de tener un sistema de ACK es decir verificar que el mensaje fue recibido. Los robots al establecer la comunicación con las antenas deben tener un Identificador (ID) como se muestra en la siguiente tabla.

ID	Robot
A	Robot 1
B	Robot 2
C	Robot 3
D	Robot 4

Fig.3.5 Identificadores de los robots

La sintaxis que debe tener los mensajes son:

Mensaje de Solicitud: [ID – ID Solicitud – Tipo de Petición]

Mensaje de Repuesta: [ID – ID Respuesta – Tipo de Petición – Respuesta]

La siguiente tabla muestra los 8 tipos de solicitudes y de respuesta que existen para la coordinación del sistema multirobot.

Tipo de Petición	Cuerpo de Mensaje	Mensaje Ida	Mensaje de Regreso	Significado
1	30	[A-S-1]	[A-R-1-30]	Pedir Tamaño Robot
2	2	[A-S-2]	[A-R-2-3]	Pide la Dimensiones del Espacio a Explorar
3	1,3 5,7	[A-S-3]	[A-R-3-1,2 4,7 8,4]	Posiciones de los obstáculos
4	5,7	[A-S-4]	[A-R-4-5,7]	Posición Inicial
5	15,8	[A-S-5]	[A-R-5-15,8]	Posición Final
6	1	[A-S-6]	[A-R-6-1]	% de Exploración
7	2,4 5,7 7,8	[A-S-7]	[A-R-7-2,4 5,7 7,8]	Petición de los Obstáculos encontrados
8	3,1 7,2 17,5	[A-S-8]	[A-R-8-3,1 7,2 17,5]	Petición de los lugares sin explorar

3.4 Algoritmo de Localización del Robot

Actualmente existen muchos dispositivos inalámbricos como son Wi-Fi, Bluetooth, xbee, RI entre otros; con ayuda de estas tecnologías se puede crear un sistema de localización basada en una arquitectura inalámbrica. La principal ventaja de la tecnología inalámbrica es la libertad de movimiento para poder calcular su posición en cualquier instante de tiempo, sólo haciendo referencia a las estaciones estáticas.

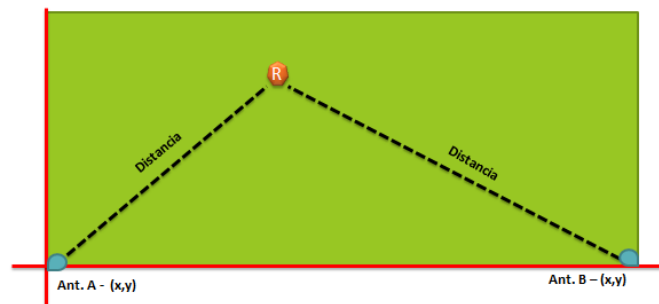


Fig. 3.6 Ambiente de Trabajo. Las antenas del ambiente pueden ser dispositivos inalámbricos que ayudan a calcular la distancia al robot.

Este proyecto considera un ambiente de trabajo como el que se muestra en la Figura 3.6 donde existen dos antenas fijas y el ambiente tiene como referencia estar colocado sobre un plano positivo, es decir, las abscisas y las ordenadas son positivas; dentro del ambiente puede navegar un robot libremente; entonces si a través de las antenas se puede estimar la distancia que tienen al robot se puede calcular la posición global del robot con respecto al ambiente.

Para encontrar la posición del robot dentro de un plano se usaron dos técnicas, las cuales se soportan en el teorema del coseno y en el concepto de intersección entre dos circunferencias.

3.4.1 Teorema del Coseno

El teorema del coseno es una extensión del teorema de Pitágoras para triángulos que no contienen un ángulo recto [6].

El teorema del coseno dice que si se tiene un triángulo determinado por los vértices ABC , como el que se muestra en la Figura 3.7, en donde α , β , γ son los ángulos, y a, b, c los lados respectivamente opuestos a estos ángulos, entonces se puede deducir la ecuación 1.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma) \quad (1)$$

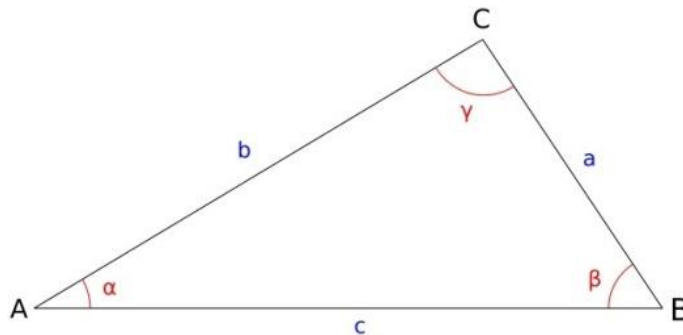


Fig. 3.7. Triángulo que no contiene un ángulo recto, al cual se le puede aplicar el teorema del coseno.

En el ambiente de trabajo se pueden conocer los 3 lados del triángulo, es decir a, b, c . El lado c corresponde a la distancia entre las antenas y como son estáticas, se puede calcular su valor, mientras que a y b son las distancia del robot a cada una de las antenas respectivamente. Así, la solución consiste en encontrar los ángulos α y β , después se calcula la ecuación de la recta

usando la fórmula de punto - pendiente, donde el punto es la posición de cada antena y con ayuda del ángulo se calcula la pendiente.

Despejando del teorema del coseno se puede encontrar cada uno de los dos ángulos, como se ve en la ecuación 2.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 - b^2 - c^2}{-2bc}\right) \quad (2)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 - a^2 - b^2}{-2ab}\right)$$

Habiendo calculado el valor de los ángulos se aplica la tangente para obtener la pendiente de las rectas y se obtiene la ecuación de cada recta. Utilizando estas dos ecuaciones, se construye un sistema que se resuelve por algún método (por ejemplo, el de determinantes), de esta manera se calcula las coordenadas del punto de intersección (x, y) que satisface a ambas ecuaciones, dicho punto es la posición el robot.

3.4.2 Intersección de dos Circunferencias.

La idea de esta solución nace observando la recta secante que interseca a dos circunferencias, como se observa en la figura 3.8.

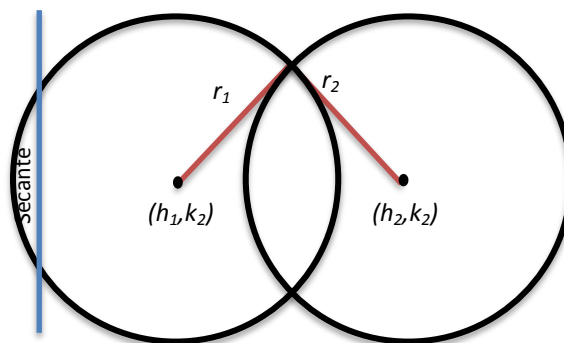


Fig. 3.8. Circunferencias secantes que tiene dos puntos en común.

Las ecuaciones de las circunferencias son de segundo orden, si se desea encontrar las coordenadas de los puntos de intersección se resuelve el sistema de ecuaciones, pero en este caso las coordenadas del centro de las circunferencias tienen algo en común, el valor de la ordena es

igual, es decir; las coordenadas de centro de las dos circunferencias son (h_1, k_1) y (h_2, k_2) , respectivamente, en donde $k_1 = k_2$.

Sobreponiendo este esquema de circunferencias sobre el ambiente de trabajo, se puede ver que las coordenadas del centro de las circunferencias corresponden a las posiciones de las antenas fijas y los radios son las distancias de las antenas al robot. Esto se observa en la Figura 3.9.

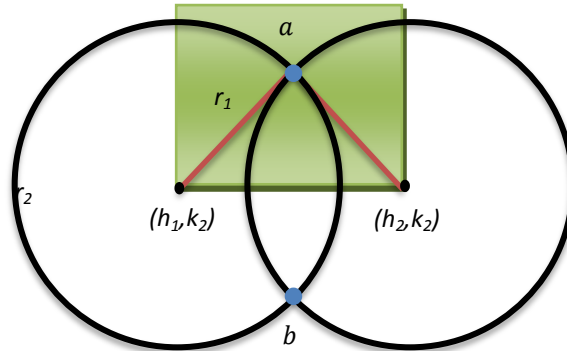


Fig. 3.9. Se puede observar que los centros de las circunferencias y las antenas tienen las mismas coordenadas.

Es necesario encontrar los puntos de intersección de las circunferencias. Si se observa la figura 6, se puede notar que el punto a corresponde a la posición del robot mientras que el punto b está fuera del ambiente de trabajo. La diferencia entre los puntos es el valor de la ordenada, es decir mientras una es positiva la otra es negativa por lo tanto, se descarta la negativa, porque no forma parte del ambiente y se está trabajando en el primer cuadrante del plano cartesiano donde los valores de las abscisas y de las ordenadas son positivas.

Al resolver el sistema de ecuaciones se tienen dos soluciones (x_1, y_1) y (x_2, y_2) donde los valores de las x son iguales pero las y son diferentes. Para encontrar las coordenadas del robot se parte del hecho de que se tienen dos circunferencias con centros en (h_1, k) y (h_2, k) es decir el valor de las ordenadas son iguales y los radios r_1 y r_2 respectivamente pueden ser diferentes o iguales por lo tanto, las ecuaciones de la circunferencia quedan como en la ecuación 3.

$$\begin{aligned} (x - h_1)^2 + (y - k)^2 &= r_1^2 \\ (3) \\ (x - h_2)^2 + (y - k)^2 &= r_2^2 \end{aligned}$$

Desarrollando las ecuaciones se obtiene la ecuación 4:

$$x^2 + y^2 - 2xh_1 - 2yk + \underbrace{h_1^2 + k^2 - r_1^2}_{(4)} = 0$$

$$x^2 + y^2 - 2xh_1 - 2yk + h_1^2 + k^2 - r_1^2 = 0$$

Para simplificar se utiliza la siguiente nomenclatura y obtenemos el sistema como se muestra en la ecuación 5.

$$E_1 = -2^2k$$

$$E_2 = -2^2k$$

$$\underbrace{D_1 = -2h_1}_{(5)}$$

$$D_2 = -2h_2$$

$$F_1 = h_1^2 + k_1^2 + r_1^2$$

$$F_2 = h_2^2 + k_2^2 + r_2^2$$

Así, la ecuación general de la circunferencia queda como en la ecuación 6.

$$x^2 + y^2 + D_1x + E_1y + F_1 = 0 \quad (6)$$

También se observa que $E_1 = E_2$ por lo que la ecuación de la recta secante queda como se ve en la ecuación 7.

$$(D_1 - D_2)x + (F_1 - F_2) = 0 \quad (7)$$

Despejando a x , se obtiene la ecuación 8.

$$x = \frac{F_2 - F_1}{D_1 - D_2} \quad (8)$$

Los valores que se obtienen para la coordenada x son iguales porque los dos puntos están en la misma abscisa, para encontrar la coordenada y es necesario sustituir el valor de x en la ecuación

original de la circunferencia, así sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 6 se obtiene la ecuación 9.

$$\left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right)^2 + y^2 + D_1\left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right) + E_1y + F_1 = 0 \quad (9)$$

Reorganizando la ecuación 9 se obtiene la ecuación 10:

$$y^2 + E_1y + \left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right)^2 + D_1\left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right) + F_1 = 0 \quad (10)$$

Suponga que $c = \left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right)^2 + D_1\left(\frac{F_2-F_1}{D_1-D_2}\right) + F_1$, entonces queda la ecuación 11

$$y^2 + E_1y + c = 0 \quad (11)$$

Por último se aplica la fórmula general y para encontrar dos valores de la ordenada y , el valor que es positivo es el que corresponde a la posición del robot, el otro se descarta.

$$y = \frac{-E_1 \pm \sqrt{E_1^2 - 4(1)(c)}}{2(1)}$$

3.5 Algoritmo de Exploración.

El algoritmo de la ola fue modificado para usarlo como una exploración y no una navegación. Para este proyecto se tuvo que acoplar a las siguientes características al algoritmo:

- A. Acoplar el algoritmo de navegación de la ola a un algoritmo de exploración recursivo.
- B. Las rutas generadas para explorar tienen que ser ortogonales.

- C. Las posiciones finales se tiene que generar al azar y no tiene que ser configuraciones ya exploradas.
- D. En el proceso del recorrido de la ruta el algoritmo debe ser capaz de detectar si tiene un obstáculo enfrente, de ser así, llamar al algoritmo de auto localización y calcular la posición del obstáculo, reportar la posición y generar nueva posición final y recalculando ruta.
- E. El fin del algoritmo es cuando no exista más configuraciones a explorar o cuando el algoritmo se cumpla con el porcentaje de exploración.

Considerando las características anteriores se modifico el algoritmo de la ola para que se realice una exploración y no una navegación, el pseudocódigo quedo en 9 pasos; recordemos que nuestro ambiente está representado por una cuadrícula donde cada cuadro es las dimensiones del robot.

1. Inicializar matriz con la etiqueta de vacío
2. Se selecciona la posición inicial y final al azar.
3. Aplicamos el algoritmo de la ola de la posición inicial a la final
4. Buscamos un camino del final al inicio usando las siguientes condicionales
 - a. Deben seleccionar los números más pequeños
 - b. El recorrido del número más pequeño se empieza en la posición de arriba y se va en sentido de las manecillas del reloj
 - c. Recordar que solo se pueden tomar las configuraciones de arriba, izquierda, derecha o abajo esto porque se requiere tener caminos ortogonales.
5. Recorremos la ruta encontrada en el ambiente a explorar
 - a. Si se encuentra un obstáculo ir al paso 6
 - b. Si no se encuentra obstáculos ir al paso 8
6. Calculamos la posición del obstáculo mediante los algoritmos de auto localización
 - a. Reportamos el obstáculo en la matriz resultante.
 - b. Etiquetamos todas las posiciones que se recorrieron como libres.
7. Ponemos Casilla de Inicio donde nos quedamos, la casilla final se genera al azar. Limpiamos la Ola y vamos a **Paso 3**.
8. Como no se encontró obstáculo se pone todo el camino como libre.
9. Definimos la casilla a la que llegamos como inicio y seleccionamos al azar el final y vamos al **Paso 3**.
10. Este algoritmo para cuando todas las celdillas están etiquetadas como libres o con obstáculos o cuando se cumple el porcentaje de exploración.

3.6 Construcción del Mapa

La reconstrucción del mapa fue muy simple porque se tiene toda la información resultante de la exploración en un matriz, por lo tanto solo se interpretó a un mapa de celdillas y a un gráfico como se muestra 3.10 en figura que muestran los siguientes aspectos.

- Reporte de los obstáculos encontrados
- Reporte de las configuraciones libres de obstáculos
- Configuraciones no exploradas.

Se genera al final una imagen jpg del ambiente reconstruido y un archivo de texto plano que tiene la configuración del ambiente y sus resultados de tal forma que se puedan usar para trabajos futuros.

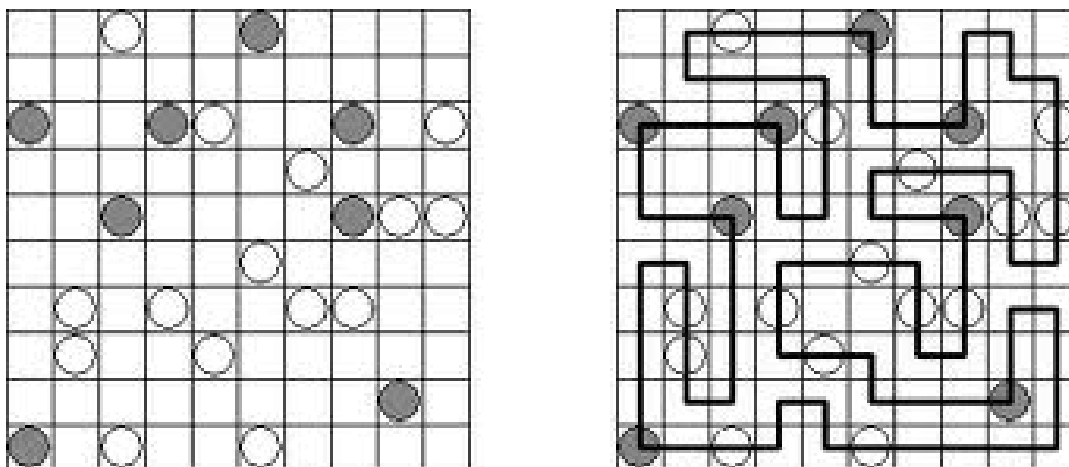


Fig. 3.10 Mapa de Celdillas

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

4.1 Estructura de la Simulación.

Se creó una estructura de simulación donde los robots son dos PC y mantienen comunicación con una tercera que funciona como el coordinador del sistema; dicho sistema tiene las siguientes características:

- Puertos Xbee S1 con base Explorer USB
- Comunicación Coordinador – Clientes.
- Configuración de Xbee con X-CTU
- No existe Comunicación entre computadoras que funcionan como robot.
- Envío y Recepción de Datos.
- Envío de Datos personalizada para las peticiones y las respuestas de tal manera que los robots rechacen los mensajes si no le pertenecen a ellos.
- ACK Implementado.
- Sistema de Reintento de enviar mensajes corruptos.

El Diagrama físico de la simulación es como se muestra en la figura 4.1.

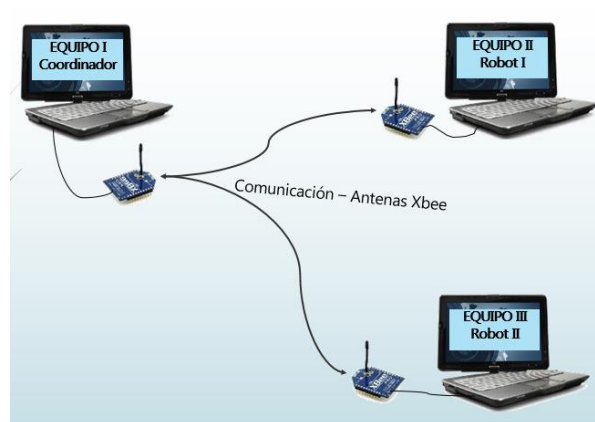


Fig. 4.1 Estructura de Simulación

4.2 Async Profesional

Era necesario tener un driver de comunicación entre los x-bee y la pc, por lo tanto se usó Async Professional 5 es una nueva versión de la herramienta de comunicaciones número uno en el mercado para Delphi y C++Builder. Como principal novedad, Async 5 permite a sus programas hablar y escuchar, gracias a su soporte directo de la Speech API (SAPI) de Microsoft.

Este Plugin tiene total soporte de 16 y 32 bits. Async Professional utiliza toda la potencia de los 32 bits compilado para Windows'95 y NT, el dispatcher de Async Professional utiliza múltiples hebras y Entrada/Salida solapada para un máximo rendimiento; pero no se deja atrás la programación de 16 bits. Async Professional se apoya en los temporizadores de Windows (y, opcionalmente, en las notificaciones de comunicaciones) para garantizar el mejor rendimiento posible en entornos de 16 bits.

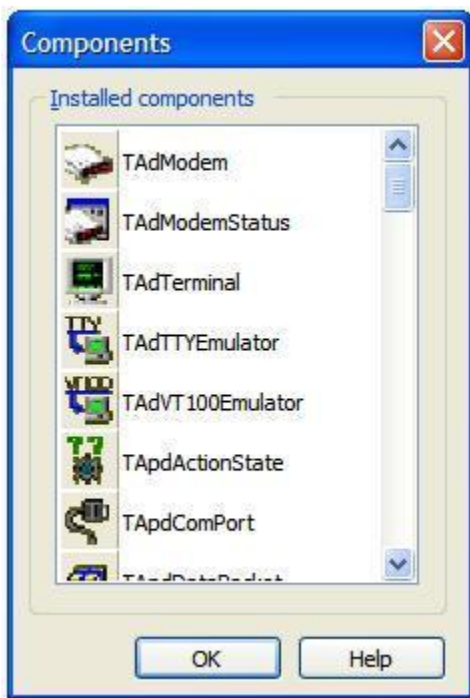


Fig. 4.2 Componentes de Async profesional 5

Los componentes de Async Professional 5 que se muestran en la figura 4.2 Tiene las siguientes características:

- Soporte de telefonía IP para transmitir audio y vídeo en formato streaming a través de Internet
- Envío y recepción de mensajes SMS mediante un dispositivo compatible GMS
- Manipulación de mensajes SMS almacenados en dispositivos GSM

- El Constructor de Máquinas de Estado le permite diseñar visualmente cualquier protocolo especializado de comunicaciones
- Incluye una base de datos XML de módems, fácilmente ampliable, y con más de 2000 módems ya definidos
- El conversor fax ahora se integra en la jerarquía TGraphic, soportando cualquier formato gráfico registrado (como JPEG)
- La conversión documento a fax ha sido mejorada y soporta múltiples tipos de documentos Windows
- La integración TAPI/Fax mejora la coordinación entre llamadas de fax entrantes y salientes
- Los componentes de envío y recepción de faxes ahora soportan módem Class 1.0
- Soporte de servidores proxy SOCKS4 y 5

4.3 Simulación del Dash Board.

El desarrollo de la simulación se llevó a cabo en el lenguaje de programación RAD Estudio XE sobre el sistema operativo de Windows 8.

El dash bard debería tener una interfaz que permitiera tener el control de los robots así como el monitoreo constante de los mensaje enviados y recibidos, por lo tanto su estructura quedo como se muestra en la Fig. 4.2.



Fig. 4.2 Estructura del Dash Board - Coordinador

El dashboard es el coordinador del sistema multi robot, se encarga de hacer las siguientes gestiones:

- Divide las dimensiones del ambiente dependiendo de los números de robots que van a explorar.
- Envía los parámetros siguientes a los robots
 - Tamaño del Robot (Tamaño de la Cuadrícula)
 - Dimensiones del Ambiente a Explorar.
 - Posición Inicial
 - Posición Final
 - Porcentaje de Exploración.
- Después de la exploración recupera los siguientes datos de cada robot.
 - Obstáculos encontrados
 - Configuraciones no visitadas.

En la Fig.4.3 se muestra la interfaz programada del coordinador; en el apéndice esta una descripción mayor de su usabilidad.

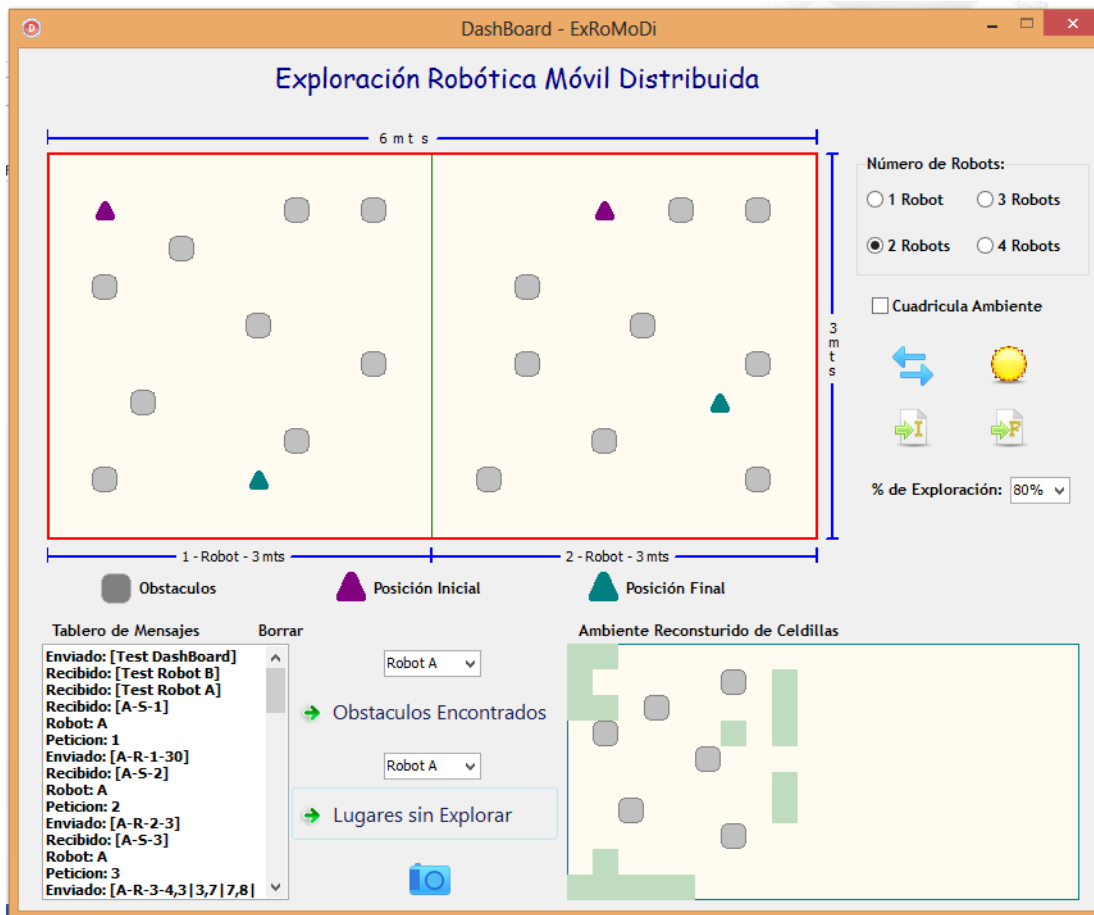


Fig. 4.3 Dash Board - Coordinador

4.4 Simulación del Robot.

El desarrollo de la simulación del robot se llevó a cabo en el lenguaje de programación RAD Estudio XE sobre el sistema operativo de Windows 8, cabe mencionar que es una sola aplicación que funciona para 4 robots es decir reconoce varias dimensiones de ambiente, gracias a su estructura dinámica.

El ambiente de simulación tiene varias áreas como se puede ver en la Fig. 4.4



Fig. 4.4 Estructura de la App del Robot.

La app del robot está encargada de realizar las siguientes gestiones:

- Define el identificador del robot, el cual tiene que ser único y va de la letra “A” a la “D”.
- Recibes los siguientes parámetros para construir el ambiente a explorar:
 - Tamaño del Robot (Tamaño de la Cuadrícula)
 - Dimensiones del Ambiente a Explorar.
 - Posición Inicial
 - Posición Final
 - Porcentaje de Exploración.

- Lleva a cabo toda la exploración del sistema tomando en cuenta el algoritmo de la ola modificado para explorar.
- La localización la lleva a cabo con el algoritmo de cosenos y el de circunferencias, calcula un promedio de los dos.
- Genera el mapa individual del sector que le tocó explorar.
- Previsualiza todas las rutas que siguió el robot.
- Comparte con el Coordinador la lista de obstáculos encontrados
- Envía al coordinador la lista de configuraciones sin explorar.
- Por último permite guardar el mapa generado en una imagen y en un archivo de texto plano.

La simulación del robot implementada se muestra en la Fig. 4.5.

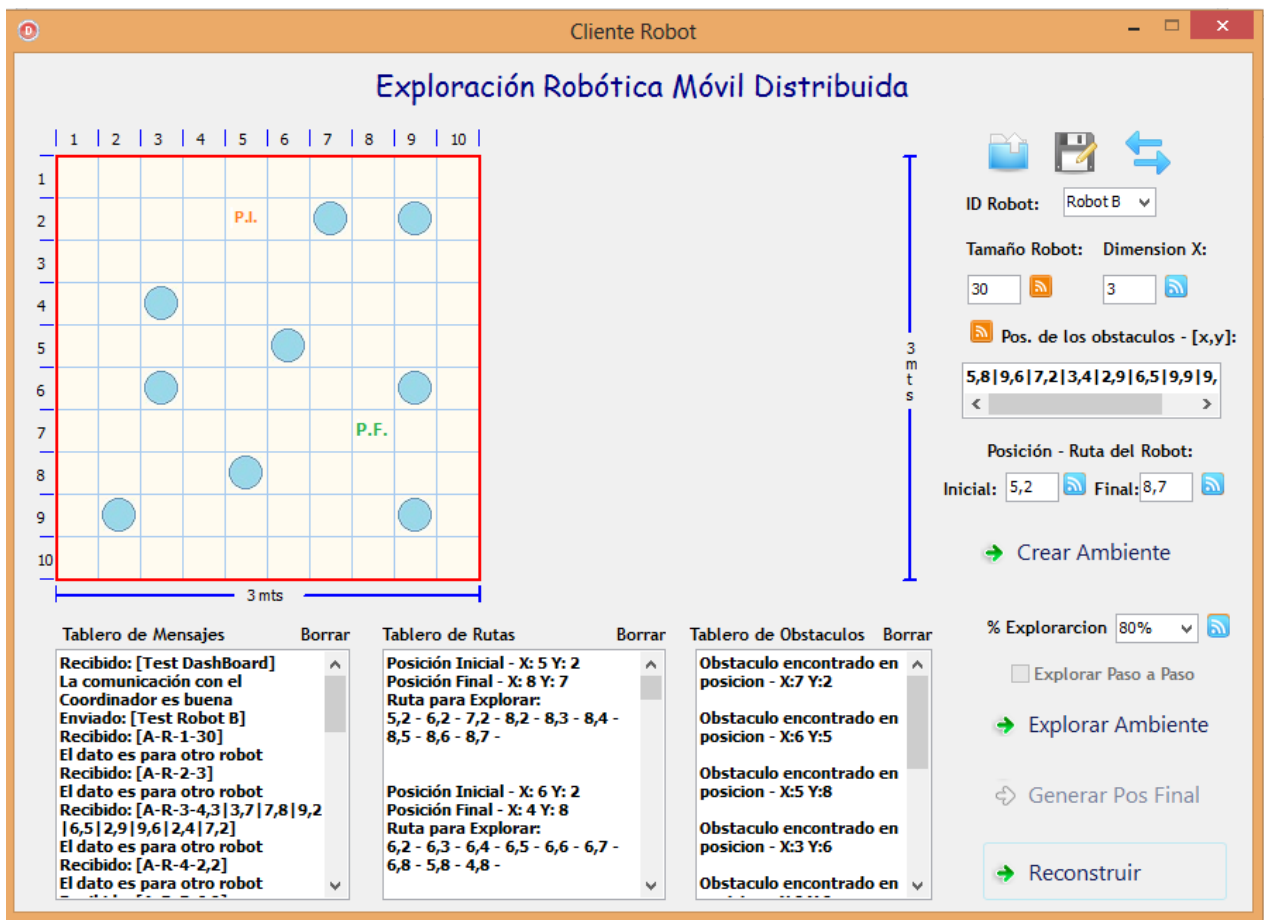


Fig. 4.5 App Simulada del Robot

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y CONCLUSIÓN

5.1 Esquema de Pruebas.

Las pruebas que se llevaron a cabo, fueron usando una estructura como se muestra en la Fig. 5.1

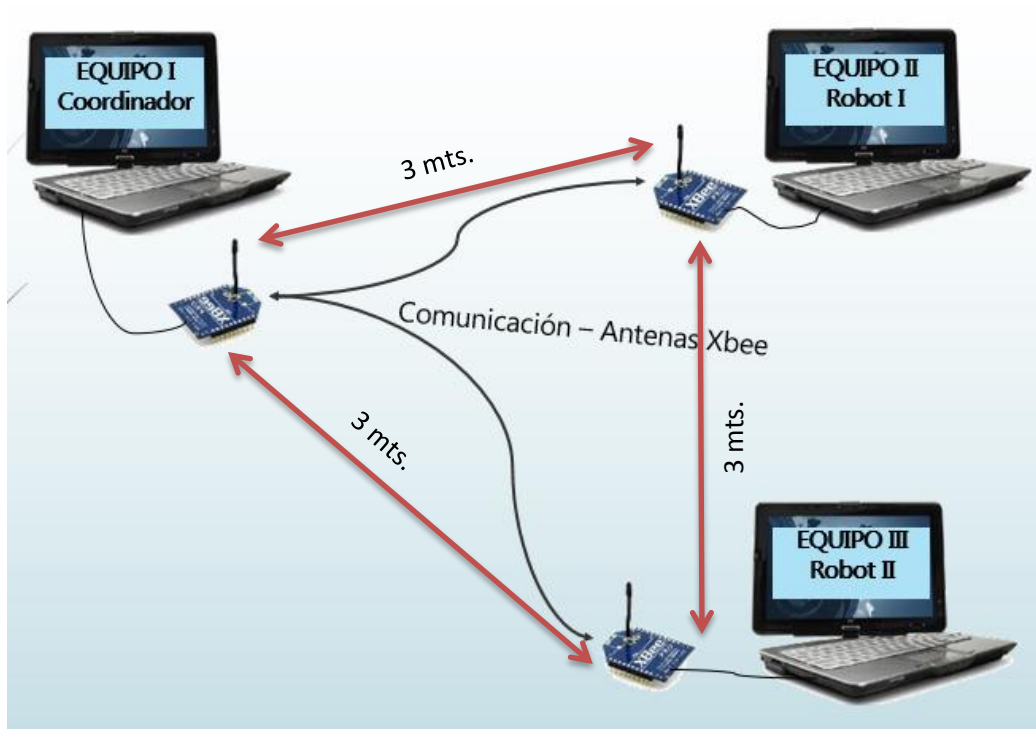


Fig. 5.1 Esquema de Pruebas

- Computadora Central que funciona como el coordinador.
- 2 computadoras que son los robots.
- Cada equipo de cómputo está dotado de un Xbee que sirve de comunicación entre ellas.
- Cada robot así como el coordinador está usando el drive async.

5.2 Ambiente simulado para las pruebas

Las pruebas se realizaron con varias dimensiones del ambiente, aunque fueron más exhaustivas usando las siguientes dimensiones y características de los robots:

- Ambiente simulado con dimensiones de 6 metros de Ancho y 3 metros de alto.
- Se usaran 2 robots, por lo tanto cada robot explora un área de 3 mts x 3 mts.
- Cada área a explorar tenía de 1 a 10 obstáculos.
- Al menos dos obstáculos estaban contiguos.
- Los porcentajes de exploración fueron de 80% y de 100%.
- Se asume que las dimensiones de cada robot a lo máximo era de 30 cm por lado.
- Se indican por primera ocasión las configuraciones iniciales y finales del robot, es decir se da el origen y destino de la primera ruta a trazar.

La Fig. 5.2 muestra un bosquejo de la estructura del ambiente a explorar y las configuraciones de los obstáculos y robots.

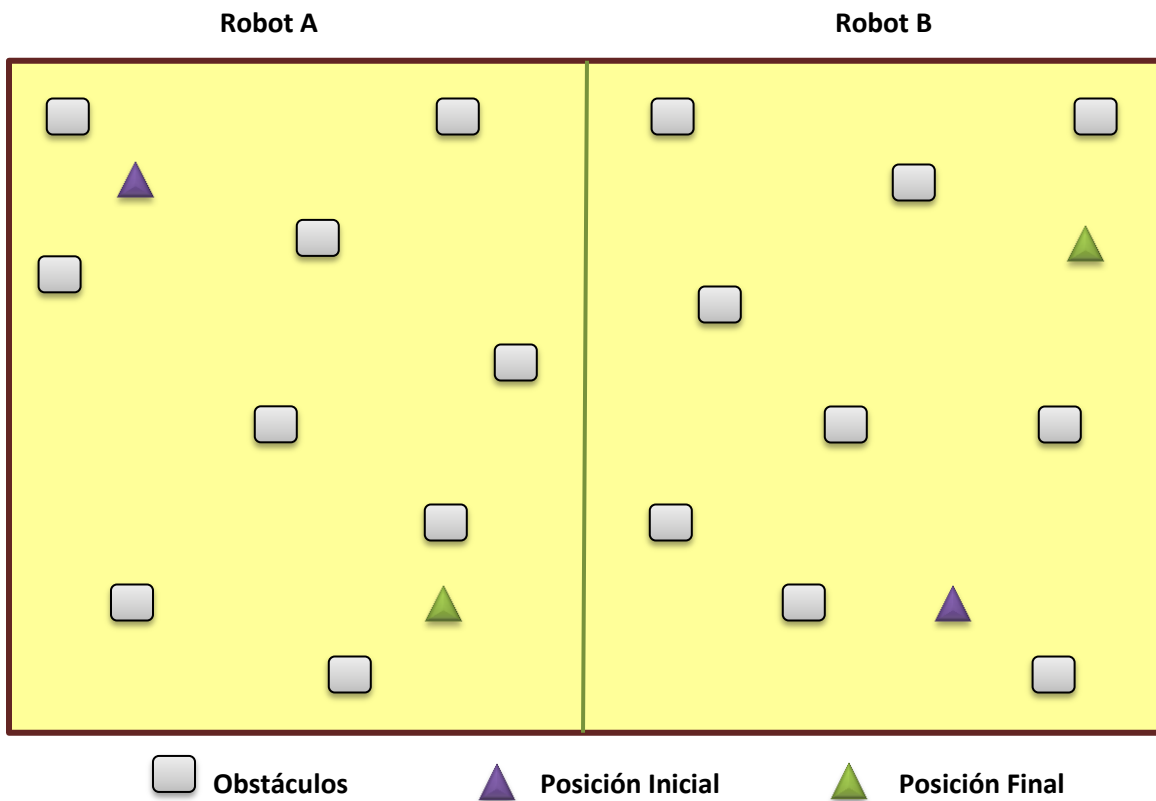


Fig. 5.2 Esquema de un ejemplo del ambiente con el que se realizaron las pruebas

5.3 Resultados de las pruebas.

En general los resultados fueron buenos y se muestran en las siguientes tablas divididas por las diferentes etapas que se realizan para la exploración y reconstrucción de un ambiente:

Etapa: Sistema de Comunicación	1 Robot	2 Robots	Comentarios
Sistema de Comunicación – Preparación del Ambiente a Explorar			
✓ Establecer comunicación del Coordinador con los robots	✓ Si	✓ Si	No se llevaron a cabo perdidas de mensajes.
✓ Los robots identifican que las mensajes son para ellos y en caso contrario los desechan	✓ Si	✓ Si	
✓ Comunicación estable para él envió de las características del ambiente a explorar.	✓ Si	✓ Si	

Etapa: Exploración	1 Robot	2 Robots	Comentarios
Algoritmo de la Ola – Proceso Recursivo			
✓ Generar por primera ocasión posición inicial y final	✓ Si	✓ Si	El sistema funciona bien con las peticiones de ambos robots, no hay perdidas
✓ Calcular trayectorias de exploración	✓ Si	✓ Si	
✓ Realizar trayectorias de exploración de la Ola	✓ Si	✓ Si	
✓ Simular Sensor de Proximidad	✓ Si	✓ Si	
✓ Si encuentra obstáculo calcular posición y reportarlos	✓ Si	✓ Si	
✓ Reportar ruta culminada y configuraciones libre	✓ Si	✓ Si	
✓ Nueva Ruta de Exploración	✓ Si	✓ Si	

Etapa: Localización del Robot.	1 Robot	2 Robots	Comentarios
Proceso de Localización – Radar			
✓ Petición de Localización al Robot	✓ Si	✓ Si	El algoritmo del coseno falla cuando se tiene un triángulo rectángulo.
✓ Reporte de distancia emitida por la simulación del Xbee	✓ Si	✓ Si	
✓ Posición con algoritmo de triangulación y circunferencias	✓ Si	✓ Si	

Etapa: Resultados de Exploración	1 Robot	2 Robots	Comentarios
Reconstrucción del Ambiente			
✓ Reconstruir el ambiente a partir de la exploración realizada.	✓ Si	✓ Si	Explora mas del porcentaje deseado

5.4 Conclusiones

Se cumplieron con todos los objetivos marcados, la estructura de comunicación es buena y se mantiene estable; de forma específica se pueden concluir los siguientes aspectos:

- El sistema de simulación en conjunto con la comunicación inalámbrica usando los dispositivos xbee arrojó resultados muy confiables.
- Los módulos de Xbee resultan ser medios de comunicación muy poderosos en el envío y recepción de datos, aunque no son los adecuados para envío y recepción de contenidos muy grandes.
- El módulo de Async Professional usado para la comunicación cumple con los estándares de zibee y no reportó ningún error.
- La exploración, localización y la reconstrucción del ambiente entregó resultados confiables y con gran información para trabajos futuros.
- La Exploración se puede hacer con caminos ortogonales y obstáculos contiguos
- El proyecto se resolvió para 4 robots pero es escalable, es decir en teoría se pueden llegar a tener hasta 256 robots conectados usando puertos Xbee.

5.5 Trabajos Futuros

- Descargar las rutas a robots reales y convertir las rutas a instrucciones de robots, ya se hicieron pruebas con Arduinos.
- Optimizar el algoritmo de exploración para que no visite más de dos veces una misma configuración.
- Generar varios caminos y elegir el más largo para tener el menor número de rutas.

- Implementar un sistema de radar en el dashboard.
- Mejorar el ACK del sistema de comunicación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Zasprom – Aspirador Robot" Zasprom.com. 22 Noviembre. 2011 < <http://www.irobot.com/> >
- [2] Fu, K. S, Gonzalez, R. C, y Lee, C. S. "Robotics: Control, sensing, vision and intelligence" New York, 1987
- [3] Calderón Estevez, Leopoldo, "Sensor ultrasónico adaptivo de medidas de distancia", Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1989.
- [4] González Jiménez, Javier y Ollero Baturone, Aníbal, "Estimación de la posición de un robot móvil", Informática y Automática, vol.29-4, España, 1996.
- [5] Cox, I.J., "Blanche - An experiment in guidance and navegation of an autonomous robot vehicle", IEEE, Trans RA, vol. 7, número 2, 1991.
- [6] Leonard J. and Durrant-Whyte, H.F., 1991, "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons." IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.7, No.3, pp. 376-382.
- [7] Borenstein, J., Everett, H.R. and Feng, L. "Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning". Universidad de Michigan, USA, Abril-1996.
- [8] González Jiménez, J y Ollero Baturone, A. "Estimación de la posición de un robot móvil" Informática y Automática. Vol.29, pp.3-18. Asociación Española de Informática y Automática. Abril - 1996.
- [9] González J. (1.993) "Estimación de la Posición y Construcción de Mapas para un Robot Móvil Equipado con un Escáner Láser Radial". Tesis Doctoral. Universidad de Málaga.
- [10] Martínez J.L. (1.994) "Seguimiento Automático de Caminos en Robots Móviles". Tesis Doctoral. Universidad de Málaga.
- [11] Reader's Digest, Gran Diccionario Enciclopédico. Mexico: Reader's Digest, 1979.
- [12] Mario Ferrari, Giulio Ferrari, Ralph Hempel. Building robots with LEGO Mindstorms. USA: Syngress, 2002.
- [13] CFIE Valladolid II, Centro de Información del Profesorado e Innovación Educativa, Robots móviles: diseño [En línea] documento electrónico disponible en Internet, [fecha de consulta: 15 de Enero de 2006]. Disponible en: http://cfievalladolid2.net/tecnoc/cyr_01/robotica/movil.htm

- [14] Xueshan Gao, Kejie Li, Yan Wang, Guangliang Men, Dawei Zhou, and K. Kikuchi. A floor cleaning robot using swedish wheels. In *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on*, pages 2069–2073, 2007.
- [15] Colouris 1994
- [18] Héctor González-Baños and Jean-Claude Latombe. Planning robot motions for range-image acquisition and automatic 3d model construction. In *AAAI Fall Symposium*.
- [19] S. Thrun. Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation. *Artificial Intelligence*, 99(1):21–71, 1998.
- [20] G. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes. Robotic exploration as graph construction. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, pages 859–865, 1991.
- [21] Verret, S. (2005). *Current State of the Art in Multirobot System*. Defense Research and Development Canada Suffield.
- [22] Dudek, G., Jenkin, M. R., Milios, E., & David, W. (1997). *A Taxonomy for Multi-Agent Robotics*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- [23] Balch, T., & Parker, L. E. (2002). *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*. Natick, Massachusetts: AK Peters.
- [24] Hibilisco, S. (2003). *Concise Encyclopedia of Robotics*. McGraw-Hill.
- [25] Chaimowicz, L., Kuma, V., & Campos, M. F. (2004). A paradigm for Dynamic Coordination of Multiple Robots. *Autonomous Robots*, 7-21.
- [26] Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., & Kahng, A. B. (1997). *Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions*. En *Autonomous Robots* (págs. 7-27).
- [27] Zebrowski, P. (2004). *Communication In Multi-Robot Systems*. 08 de Noviembre de 2011, de <http://www.sfu.ca/~pzebrows/cmpt816/implicit.htm>
- [28] McFarland, D. (1994). *Towards robot cooperation*. Cambridge MA: The MIT Press.
- [29] Jaffé, K. (1993). *El mundo de las hormigas*. Maracaibo: Editorial Equinoccio, Universidad Simon Bolívar.
- [30] Mataric, M. J. (1994). *Interaction and Intelligent Behavior*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [31] Borenstein, J., Everett, B., & Feng, L. (1996). *Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques*. Wellesley, MA: A. K. Peters

- [32] Gallardo, L. D. (1999). Aplicación del muestreo bayesiano en robots móviles: estrategias para localización y estimación de mapas del entorno. Universidad de Alicante.
- [33] G. Nuño-Barrau y J.M. Páez-Borrillo, "Algoritmos para localización en interiores mediante WLAN comerciales basados en funciones discriminantes lineales y modelos ocultos de Markov" Tesis Doctoral ETSI Telecomunicación, Madrid, 2006.
- [34] IEEE Std 802.11g-2003, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band".
- [35] Shin D. H., Singh S. (1.990) " Path Generation for Robot Vehicles Using Composite Clothoid Segments". The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University. Internal Report CMU-RI-TR-90-31.
- [36] Robot Builder's Bonanza: 99 Inexpensive Robotics Projects, Gordon McComb, McGraw-Hill.
- [37] BRÄUNL, T. 2003. "Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems" Springer.