



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ingeniería Electrónica,
Opción Instrumentación Electrónica

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería
Electrónica

Implementación de una red VANET de bajo consumo de
potencia para el monitoreo de un invernadero.

Presenta:

Elías Christopher García Herrera*

Directora:

Dra. Josefina Castañeda Camacho

Co-Asesores:

Dr. Moisés Gutiérrez Arias

Dra. Gabriela Pérez Osorio

Dr. Edgar Peralta Sánchez

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca de manutención otorgada para la realización de este trabajo.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por mi formación académica y todos los beneficios otorgados.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE), por todas las facilidades brindadas (laboratorios, cursos y congresos) que hicieron posible la culminación de este trabajo.

A mi directora de tesis Dra. Josefina Castañeda Camacho por haberme guiado en la elaboración de este trabajo, gracias por el apoyo

A mis codirectores de tesis, por compartir su experiencia y su conocimiento.

A mi jurado de tesis por sus valiosas observaciones para la mejora de mi trabajo

A mi madre que siempre me ha apoyado con su amor y cariño. Sin su ayuda difícilmente hubiera logrado llegar hasta aquí.

Índice

Introducción	6
Justificación	7
Estado del arte	8
Objetivos	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos	10
Descripción	11
1. Introducción al concepto de redes de comunicación inalámbricas tipo VANET	13
1.1. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas	13
1.1.1. Redes Ad Hoc	13
1.1.2. Redes VANET	13
1.2. Redes de sensores inalámbricas	14
1.3. Redes de Sensores Inalámbricas Móviles	14
1.4. Estándar IEEE 802.15.4	15
1.5. Especificación Zigbee	15
1.6. Topologías	16
1.6.1. La topología Digimesh	17
1.7. Protocolos de enrutamiento	18
1.7.1. Protocolo reactivo AODV para redes con topología Zigbee y Digimesh	18
1.8. Redes de sensores en invernaderos	18
1.8.1. Factores Climáticos en Invernaderos	19
1.8.2. Temperatura	19
1.8.3. Humedad Relativa	19
1.8.4. Dióxido de Carbono	19
1.8.5. Iluminación	20
2. Modelo cinemático y diseño de control del robot móvil diferencial de dos ruedas	21
2.1. Locomoción	21
2.1.1. Ecuaciones de movimiento de Robot diferencial de dos ruedas	21
2.1.2. Configuración en el sistema de coordenadas global del modelo cinemático del robot diferencial de dos ruedas	23
2.2. Detección de movimiento	23
2.3. Teoría de estabilidad de Lyapunov	23
2.3.1. Método directo de Lyapunov	24
2.4. Control de posición del robot móvil diferencial	24
2.4.1. Análisis de estabilidad de Lyapunov del control de posición	26
2.5. Control de camino a una velocidad constante	26
2.5.1. Análisis de estabilidad de Lyapunov para seguimiento de camino a una velocidad constante	27

3. Simulación en MATLAB del ambiente de propagación de una red de sensores inalámbricos con dos nodos VANET y un nodo fijo	29
3.1. Indicación de intensidad de señal recibida (RSSI)	29
3.2. Parámetros de la simulación	29
3.3. Resultados de la simulación en MATLAB	30
3.3.1. Simulación del control de posición	30
3.3.2. Simulación de control de seguimiento de camino a una velocidad constante	31
3.3.3. Valores de RSSI de diferentes puntos de los caminos recorridos por los dos nodos VANET	32
4. Implementación de la Red VANET con dos nodos móviles	34
4.1. Hardware	34
4.1.1. Microcontrolador STM32L476RGT	34
4.1.2. Módulo inalámbrico de transmisión y recepción de datos Xbee S2C	35
4.1.3. Puente H L298N	35
4.1.4. Sensor de CO2	36
4.1.5. Sensor de Temperatura y Humedad DHT22	37
4.1.6. Sensor de Luz BH1750	37
4.1.7. Sensor de movimiento MPU6250	38
4.1.8. Integración del Hardware	39
4.2. Control de los motores DC del Robot diferencial	39
4.2.1. Identificación de los parámetros del motor con entrada en lazo abierto	40
4.2.2. Sintonía lambda del sistema en lazo cerrado	40
4.3. Implementación control de seguimiento de camino	41
5. Resultados de la implementación de la red VANET con dos nodos móviles: mediciones de RSSI y variables ambientales	45
5.1. Configuración de la red VANET	45
5.2. Medición de RSSI para validar resultados del modelo de propagación	46
5.3. Medición de variables ambientales con dos nodos VANET	49
Conclusiones	50
Referencias	52
Apéndice	55
Anexos	57
Publicaciones	57

Índice de figuras

1.	Nodo Sensor	11
2.	Comunicación a la estación base	12
1.1.	Red VANET	14
1.2.	Red de sensores inalámbrica no estructurada. Las líneas punteadas representan las posibles rutas para comunicar de la información	15
1.3.	Topología Estrella, Topología de Arbol y topología malla(punto-punto)[24]	17
1.4.	Topología digimesh[26].	17
1.5.	Protocolo AODV[24].	19
2.1.	Modelo cinemático de robot diferencial [31]	22
2.2.	Modelo cinemático de robot diferencial con punto de control en a	25
2.3.	Camino a seguir en el invernadero	27
3.1.	Esquema de simulación en Matlab del invernadero	30
3.2.	Velocidades lineal y angular en el nodo 1	31
3.3.	Velocidades lineal y angular del seguimiento de camino a una velocidad constantes	31
3.4.	Errores en X y Y del camino recorrido	32
3.5.	Factor RSSI de la estación base respecto a los diferentes puntos recorridos por los nodos VANET	33
4.1.	Tarjeta de desarrollo Nucleo-L476RG	34
4.2.	Módulo de comunicación inalámbrica S2C	35
4.3.	Puente H L289	36
4.4.	Sensor de CO2 senseair k30	36
4.5.	Sensor de Temperatura y humedad DHT22	37
4.6.	Sensor de luz BH1750	38
4.7.	Sensor con acelerómetro y giroscopio MPU6050	38
4.8.	Nodo sensor VANET	39
4.9.	Etapas de control	40
4.10.	Respuesta de motor a un escalón en lazo abierto	40
4.11.	Respuesta del sistema en lazo cerrado	41
4.12.	Respuesta a la señal coseno con sintonía fina	42
4.13.	Camino recorrido por el robot	43
4.14.	Velocidades lineal v y angular ω del robot diferencial	43
4.15.	Evolución del error	44
5.1.	Configuración de los nodos para formar la red	45
5.2.	Medición del nivel RSSI en el invernadero con antena receptora a nivel del suelo	46
5.3.	Gráfica de RSSI vs Distancia con respecto al nodo receptor	47
5.4.	Medición del nivel RSSI en el invernadero con antena receptora a 90cm del suelo	48
5.5.	Gráfica de RSSI vs Distancia con respecto al nodo receptor con una altura de 90cm	48
5.6.	Medición de los parámetros ambientales	49

Índice de Tablas

1.	Descripción resumida de las capas de la especificación Zigbee	16
2.	Puntos que forman el camino a recorrer por el robot móvil	30
3.	Trama de datos API para transmisión de datos	45

Introducción

Las redes de sensores inalámbricas (WSN: Wireless Sensor Network) permiten la lectura de las variables físicas en un lugar específico. Constan de un conjunto de unos pocos o miles de nodos (dependiendo del tipo de aplicación) y tienen el hardware necesario para medir, procesar y transmitir la información captada por medio de sensores a través de una red inalámbrica, típicamente de manera ad-hoc [1]. Estudios recientes han revelado que se puede añadir movilidad a estos nodos para mejorar el tiempo de vida de las redes o restablecer conexión en lugares donde un nodo ha dejado de funcionar [2]. Las redes vehiculares tipo ad-hoc (VANET: Vehicular Ad-Hoc networks) surgen como apoyo para la transmisión de información en vehículos móviles[3]. El concepto de redes VANET en conjunto con la aplicación de redes de sensores inalámbricas surgen como una opción adicional para el monitoreo del ambiente con pocos nodos móviles en un espacio en lugar de utilizar varios nodos estáticos de una red de sensores tradicional.

Las redes de sensores tienen una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos: militar, salud, monitoreo ambiental, industrial, urbano, seguimiento de flora y fauna [4]. En la agricultura se utilizan particularmente para lograr un estado llamado Agricultura de Precisión (PA). PA trabaja con los fenómenos observados (utilizando sensores) y, con ayuda de los datos recolectados por la red, controlar dichos parámetros con actuadores con el fin de obtener las condiciones necesarias para la salud óptima de los cultivos.

Los invernaderos son una innovación en la agricultura que permiten controlar y regular el ambiente de los plantíos. Estos trabajan con el concepto del efecto invernadero: la luz del sol llega al invernadero por medio de techos y muros transparentes. Debido a que es una estructura cerrada, el calor no puede salir tan fácilmente y este queda atrapado dentro del invernadero. En la actualidad hay una gran cantidad de ellos alrededor del mundo que utilizan tecnologías con sistemas artificiales de ventilación, iluminación, bombeo de calor, rocío, etc [1].

En México un estudio realizado por el INEGI [5] en el año 2017 demostró que existen 17,388 unidades de producción que realizan agricultura protegida; esta se caracteriza por el uso de instalaciones que protegen los cultivos de las condiciones ambientales a su alrededor. El 54.1% de estas unidades pertenecen a invernaderos. Las principales tecnologías usadas en la agricultura protegida son sistemas de riego como goteo, microaspersión y nebulización, bombas de riego, aspersoras para agroquímicos, sistemas de fertirrigación, asistencia técnica para la producción y polinización controlada. En un estudio realizado por el Banco Interamericano de desarrollo[6] (IDB) en el año 2019 se realizó un análisis sobre los distintos niveles de tecnologías empleadas en los invernaderos en México. El uso de tecnologías avanzadas como calentadores y sistemas de riego evitan la pérdida de cosechas, aseguran su producción cuando los precios son más altos, y permiten emplear trabajadores a lo largo del año. También se demuestra que los invernaderos en México que han adaptado tecnología avanzada proveniente de Holanda consumen menos energía que los invernaderos en Europa debido a que el clima en algunas regiones del país es constante y óptima para los cultivos a lo largo del año.

Justificación

El banco mundial reporta que en el 2020 la agricultura representaba el 3.8 % del PIB en México [7], ICEX España Exportación e Inversiones informó [8] en el año 2018 que la asociación Mexicana de Horticultura Protegida registró 13,397 hectáreas del territorio mexicano pertenecen al uso de invernaderos de las cuales se generan alrededor de 68.78 millones de toneladas de producción. Por otro lado, los macro túneles tienen una superficie de 14,554 hectáreas con una producción de 6.53 millones de toneladas y las mallas sombras cuentan con una superficie de 20,648 hectáreas con una producción 1.89 toneladas. Estas tres técnicas pertenecen a la agricultura protegida y la técnica que presenta mayor rendimiento es la de los invernaderos, por lo tanto esta es una de las técnicas que pueden conservar mejor las cosechas debido al ambiente controlado.

Los proyectos en invernaderos de alto valor (5 %) están en Jalisco y Sonora. Le siguen invernaderos de mediano costo (25 %) en el Bajío, y de bajo costo (70 %) ubicados principalmente en los estados de Baja California y Sinaloa.[9]

Se considera invernadero de baja tecnología a aquel con costo promedio de \$70 pesos/ m^2 , compuesto de elementos sencillos o que responde a una casa-sombra. Los invernaderos de tecnología media cuestan unos \$250 pesos/ m^2 y son en muchos de los casos estructuras semi-automatizadas. Un invernadero de alta tecnología cuesta unos \$1,500 pesos/ m^2 y está totalmente automatizado. El empleo de este tipo de tecnologías en el país con sistemas de bajo costo podría impulsar la producción obteniendo mejores y más productos por cada invernadero y favoreciendo la economía del país.

La perspectiva mundial demográfica (World Population Prospects) es un estudio de estimaciones y proyecciones a futuro realizado por la División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Secretaría de las Naciones Unidas[10], en su última actualización en el año 2019 se estima que la población es de 7.7 mil millones y se proyecta que para el año 2059 existirá un incremento de la población a 9.7 mil millones. La necesidad por obtener suficientes suministros de alimentos será crucial, por lo que la Agricultura de Precisión sin duda jugará un rol importante para la obtención de alimentos de calidad y cantidad. Una de las características de los invernaderos es la posibilidad de cultivar incluso fuera de la temporada de siembra de un producto, por lo que el desarrollo de tecnologías relacionadas a esta área será de mucha ayuda en los años por venir para el suministro de alimentos.

Estado del arte

Mientras más control se tenga sobre las variables ambientales que afectan los cultivos, mejores cultivos pueden esperarse. Diversos trabajos pueden encontrarse en la literatura en cuanto al manejo de redes de sensores inalámbricas en los invernaderos. Como se definió anteriormente, estas redes ayudan a recopilar la información de las variables en un espacio. El espacio de monitoreo de este trabajo se enfoca en los invernaderos. El despliegue de los nodos estáticos en el espacio ha sido manejado de muchas maneras ya sea distribuido al azar en el espacio o en forma cuadrículada para obtener un alcance más equilibrado en los nodos sensores[11], pero en cuanto al despliegue de sensores móviles no hay alguna metodología establecida para el despliegue físico, pues la movilidad en los sensores se ha trabajado en pocas propuestas.

Para el muestreo y transmisión de las variables físicas hay distintas metodologías probadas, en [12] se usa un muestreo y transmisión en periodos de tiempo constantes la cual no es la mejor debido a que consume mucha energía en la transmisión, para solucionar este problema en [13] se transmiten los datos en intervalos de tiempo más largos y promediando las muestras de este intervalo para no perder precisión en los datos, otros trabajos como [14] usan un muestreo más frecuente después de que cierto umbral δ en la medición ha sido superado lo cual indica que un cambio significativo se ha detectado en las medidas y hay una necesidad de tomar un mayor número de muestras.

En cuanto a las tecnologías de comunicación inalámbrica que usan las redes de sensores está Zigbee que es ampliamente utilizada en diversos trabajos debido al bajo consumo de energía y la facilidad de su conexión en topologías tipo ad hoc [15], otro trabajo ha usado tecnología Xstream que es un módulo de radiocomunicación de largo alcance, que puede transmitir en un rango de 5-16 km [16], tecnologías como bluetooth y wi-fi también han sido alternativas a usar. Una de las más nuevas tecnologías de comunicación pensada para internet de las cosas y redes de muchos nodos que también ha sido usada para el monitoreo en los invernaderos es LoRa (Long Range). Sin embargo, debido a que es una tecnología muy reciente pocas empresas manejan la gestión de los datos de LoRa en la nube, aunque podría ser de gran ayuda en el futuro[17]. La información obtenida por las redes de sensores se usa para alimentar una base de datos en un computador que puede ser remoto o ubicarse cerca del invernadero, aquí se puede visualizar el estado del invernadero y también se puede controlar las variables del invernadero. Este trabajo se limitará a hacer el monitoreo de las variables por medio de plataformas móviles, usando dos sensores móviles. En conjunto con la tecnología de comunicación también se debe seleccionar el protocolo de comunicación a utilizar, dos de los principales protocolos dinámicos son AODV y DSR[18]. Son dinámicos porque los nodos sensores solo establecen comunicación cuando se requiere transmitir información y temporalmente hasta que la transferencia de datos haya terminado. La elección de un protocolo es fundamental en las redes de sensores inalámbricas por el costo de consumo de energía en el momento de transmitir información. Si la red se mantuviera transmitiendo todo el tiempo, el consumo de energía sería muy alto.

En la literatura se encuentran pocos trabajos relacionados con la movilidad de los nodos sensores en invernaderos, en [19] usan un robot móvil que es autónomo y puede navegar libremente por el invernadero, pero su principal desventaja radica que es un sistema de alto costo debido a los componentes que utiliza. En [20] también se ha usado un robot móvil para el monitoreo

de variables a través de un sistema de movilidad que sigue líneas, lo cual no le permite tanta autonomía, pero reduce los costos del sistema de navegación del robot. Este trabajo a diferencia de los dos previos se basará en la implementación de más de un nodo móvil. De tal modo que la navegación, el muestreo de las variables ambientales y los protocolos de comunicación serán parte de nuestros objetivos.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar una red de nodos VANET de bajo consumo energético para el monitoreo de las variables que intervienen en la operación de un invernadero y control de la posición de los vehículos móviles.

Objetivos Específicos

1. Analizar y modelar el funcionamiento de una red VANET y las normas que la regulan para su aplicación en la medición de parámetros de un invernadero.
2. Definir las estrategias de medición de las variables físicas fundamentales del invernadero, temperatura, humedad, nivel de CO₂ y luminosidad que serán monitoreadas por la red VANET
3. Diseñar una simulación que haga posible el monitoreo de los parámetros del invernadero a través de una red de 2 nodos móviles.
4. Diseñar el sistema de control de los nodos VANET para seguir trayectorias dentro del invernadero.
5. Implementar una red de 2 nodos con el sistema de comunicaciones y control.
6. Validar los resultados obtenidos comparándolos con lo reportado en la literatura en las mediciones reales.

Descripción

Para obtener las mediciones de las variables físicas se utilizarán sensores de temperatura, humedad, nivel de CO2 y luminosidad. Los sensores estarán conectados a un microcontrolador para obtener los valores de las variables, después el microcontrolador enviará los datos de manera ad-hoc con múltiples saltos a otros nodos sensores por medio de un tranceptor o con un solo salto si está cerca de la estación base. El nodo sensor está implementado sobre un robot móvil (VANET) que se moverá a través del invernadero. En la Figura 1 se observa el diagrama de bloques del nodo sensor.

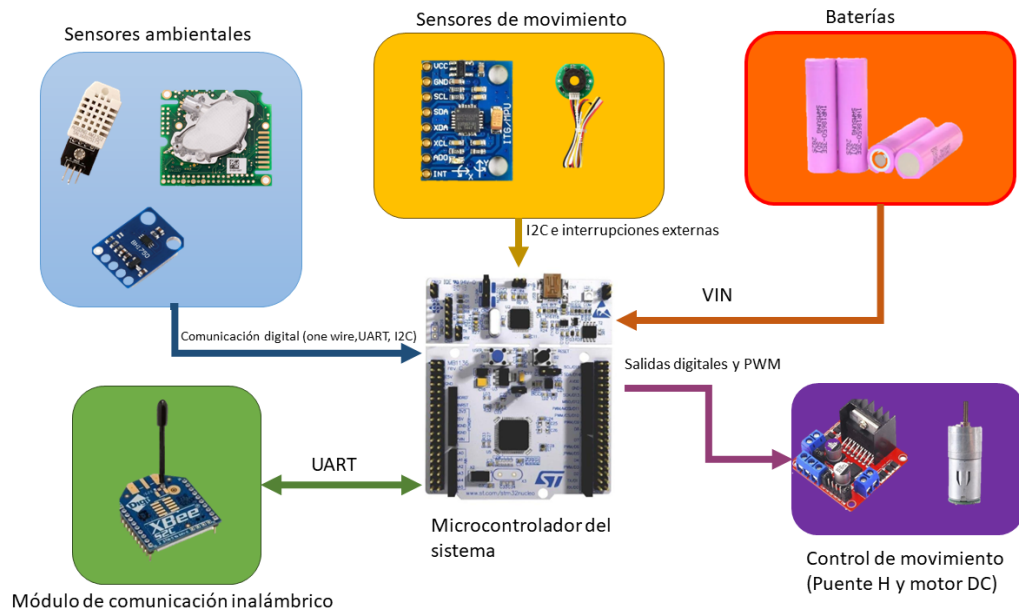


Figura 1: Nodo Sensor

El tiempo de muestreo de medición de variables ambientales en el nodo sensor se deberá establecer y la estrategia de comunicación entre nodos.

Adicionalmente existen diversos tipos de comunicación ad-hoc, para esta propuesta se plantea que la comunicación de los nodos sea dinámica, es decir, que solo se establezca una ruta de datos cuando sea necesario transmitir información con los nodos vecinos. Esta ruta de datos proporcionará información al nodo receptor sobre la información del ambiente en el invernadero.

El nodo receptor o estación base recibirá la información de los nodos móviles y la mostrara a los usuarios.

En la Figura 2 se plantea el funcionamiento del sistema.

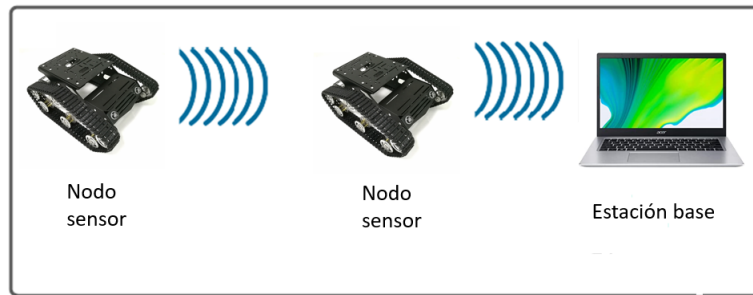


Figura 2: Comunicación a la estación base

Organización de la Tesis

El capítulo uno contiene las nociones básicas de redes de sensores inalámbricas y los parámetros ambientales que se deben medir en un invernadero para que los cultivos tengan un óptimo nivel de desarrollo. En el capítulo dos se estudia el robot móvil diferencial, los conceptos fundamentales de la teoría de estabilidad de Lyapunov y después se establece un control haciendo uso del análisis de estabilidad de Lyapunov para lograr que el error tenga convergencia al equilibrio. El capítulo tres establece el entorno de simulación de movimiento de los dos nodos móviles VANET, la necesidad de medir el factor RSSI para el análisis de la potencia recibida en el nodo receptor de datos del ambiente en el invernadero. Con el objetivo de evaluar si las distancias son suficientes para la transmisión exitosa de los datos. El capítulo cuatro describe el hardware utilizado para las pruebas de movimiento y obtención de la información en el ambiente y la implementación del control de seguimiento de camino. El capítulo cinco contiene los resultados obtenidos de las mediciones ambientales y el factor RSSI. Y finalmente se presentan las conclusiones sobre los resultados obtenidos en este trabajo.

Capítulo 1 Introducción al concepto de redes de comunicación inalámbricas tipo VANET

1.1. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas

Las redes computacionales se han vuelto una parte esencial en nuestro mundo, en el día a día se puede observar en los negocios, seguridad de la información, entretenimiento, almacenamiento en la nube, educación, etc. Las redes ponen la información y los servicios a disposición de cualquier persona de la red, independientemente de la ubicación física de los recursos o de los usuarios. Se pueden dividir en varios tipos

- Redes de área personal (PAN): Es una red organizada para ser usada por una sola persona.
- Redes de área local (LAN): Red que se usa para conectar un conjunto de computadoras en un edificio o uno pocos edificios
- Redes de área metropolitana (MAN): Red que conecta múltiples computadoras en una ciudad
- Redes de área amplia (WAN): Son redes de gran alcance, puede ser un país o un continente.

Las comunicaciones cableadas son muy confiables para la transmisión de datos, pero la necesidad de cableado conlleva un gran costo. Además de que se tiene que planificar la forma en que se cableara, también se tiene que tomar en cuenta la adición de un nuevo usuario, lo que involucra mano de obra, material, pruebas y verificación. A redes de grandes escalas este tipo de situaciones pueden ser problemáticas. Para solucionar este tipo de problemas, se usan redes inalámbricas. Al igual que las redes cableadas, existen redes inalámbricas para cada uno de los distintos tipos mencionados anteriormente: WPAN, WLAN, WMAN y WWAN.

1.1.1. Redes Ad Hoc

Las redes Ad hoc surgen alrededor de 1969. Originalmente se les conocía por “radio conmutada por paquetes” la cual era ocupada con fines militares para interconectar nodos móviles en el campo de batalla, pero no fue hasta principios de los 70’s donde a través del proyecto DARPA se dio a conocer como red inalámbrica Ad hoc [21]. Este tipo de red está formada por un cierto grupo de usuarios móviles distribuidos en cierta región, los cuales delimitan la cobertura de la red Ad hoc. Cada nodo de la red (usuario) cuenta con un transmisor y receptor que le permite comunicarse con los otros nodos. Además, al tratarse de una red auto organizada, esta no requiere de una estación base, es decir, cada nodo perteneciente a la red es capaz de generar datos para cualquier otro nodo de la red. De esta forma, todos los nodos pueden funcionar como estaciones retransmisoras para que los paquetes de datos sean encaminados a su destino final[22].

1.1.2. Redes VANET

VANET (Vehicular Ad-hoc Network) es un caso particular de red multisalto (multi - hop) inalámbrica, que tiene la restricción de cambios rápidos de topología debido a la alta movilidad de los nodos. Con el creciente número de vehículos equipados con tecnologías informáticas y dispositivos de comunicación inalámbricos la comunicación entre vehículos se está convirtiendo en un campo prometedor de investigación, estandarización y desarrollo. Las VANET permiten una amplia gama de aplicaciones, como prevención de colisiones, seguridad, cruce ciego, programación dinámica de rutas, monitoreo de condiciones de tráfico en tiempo real, etc. Otra aplicación

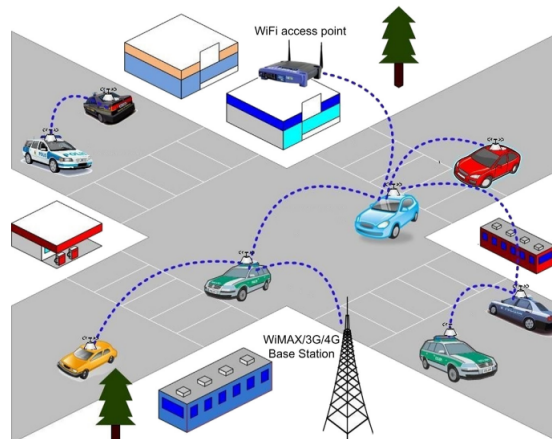


Figura 1.1: Red VANET

importante para las VANET es proporcionar conectividad a Internet a los nodos vehiculares [3]. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de una VANET.

1.2. Redes de sensores inalámbricas

Dentro del conjunto de las redes WPAN existen un tipo especial de red usada para el monitoreo y control de variables ambientales en un espacio. Estas son las redes de sensores inalámbricas (WSN: Wireless sensor network). Las WSN son un grupo de sensores y actuadores autónomos especializados con una infraestructura de comunicación inalámbrica, con el propósito de monitorear controlar las condiciones físicas y ambientales en diversos lugares de un espacio y a transmitir cooperativamente sus datos a una ubicación principal y/o pasar ordenes de control a un actuador a través de la red. La Figura 1.2 muestra el funcionamiento de este tipo de redes. Cada nodo de la red está equipado con uno o varios sensores (sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de luz, sensor de dióxido de carbono, etc.), un microcontrolador, una fuente de alimentación y un módulo de comunicación. Los datos de las variables físicas ambientales son colectados por los sensores, después son procesados por el microcontrolador y son enviados a través de la antena del módulo de comunicación a la estación base. El envío de los datos a la estación base puede enviarse:

- Periódicamente: Se predefine un intervalo de n cantidad de tiempo y la transmisión se hace cada vez que transcurre este tiempo n .
- Por eventos: Cuando sucede un evento en el monitoreo de los datos. Por ejemplo, que las medidas alcancen un umbral para actualizar correctamente la medida anterior.
- Por petición directa del usuario: Cuando los usuarios hacen una solicitud de la lectura de los datos.

1.3. Redes de Sensores Inalámbricas Móviles

Estas redes consisten en un conjunto de nodos sensores que pueden moverse por sí solos e interactuar con el entorno físico. Una red de sensores móvil puede comenzar con un despliegue

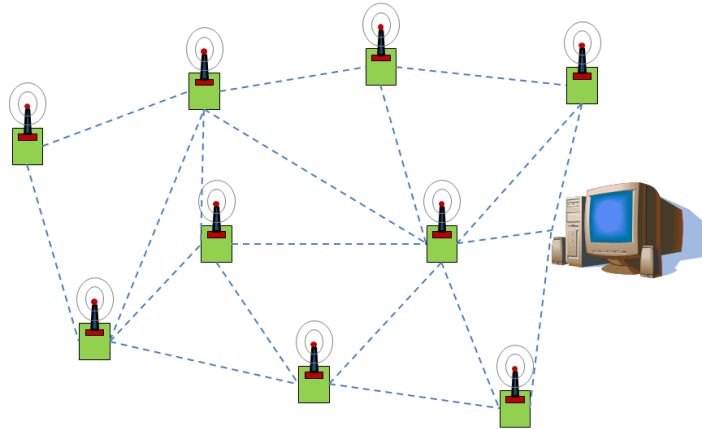


Figura 1.2: Red de sensores inalámbrica no estructurada. Las líneas punteadas representan las posibles rutas para comunicar de la información

inicial en el espacio y los nodos se pueden mover a distintas áreas para recopilar información. La información recopilada por un nodo móvil se puede comunicar a otro nodo móvil cuando están dentro del rango del otro. En una red con nodos estáticos, los datos se pueden distribuir usando enrutamiento fijo, es decir que las rutas por donde pasa la información es única, o inundación mientras que el enrutamiento dinámico se utiliza en una red de sensores móviles. Las aplicaciones de redes de sensores móviles incluyen, entre otras, la vigilancia del medio ambiente, el seguimiento de objetivos, la búsqueda y el rescate [23].

1.4. Estándar IEEE 802.15.4

El diseño de software de una WSN necesita basarse en algunos estándares para asegurar que el sistema de red funcione en distintas plataformas de hardware. El estándar IEEE 802.15.4 (2003) fue diseñado para aplicaciones de Red de área personal de bajas tasa (LR-WPAN) de manejo de datos. Las redes de sensores inalámbricas entran en esta categoría, pues solo requieren transmitir la información de los sensores, además que cada nodo de una red de sensores tiene recursos limitados (principalmente en fuente de alimentación). Este estándar solo está especificado para la capa física y capa de acceso de control al medio (MAC) y define solo dos tipos de topologías de red: estrella y punto-punto[24].

1.5. Especificación Zigbee

Es un conjunto de protocolos creado en 2004 basados en el estándar IEEE 802.15.4, el cual solo está especificado para la capa física y de enlace. Zigbee consiste en agregar la capa de red, una subcapa de soporte de aplicaciones, gestión de servicios de seguridad en la red y el objeto de dispositivo zigbee. La Tabla 1 describe estos cada uno de estos aspectos. Este conjunto de protocolos fue creado con el propósito de establecer redes inalámbricas de gran escala. Sus

características son enfocadas a tener un bajo costo, baja tasa de datos, baja complejidad, bajo consumo de energía y fácil de implementar [25]

Tabla 1: Descripción resumida de las capas de la especificación Zigbee

Capa Zigbee		Descripción
Física(IEEE 802.15.4)		Define la operación física de los dispositivos como sensibilidad de recepción de datos, rechazo de canal, potencia de salida, número de canales, modulación y especificaciones de velocidad de transmisión. La mayoría de aplicaciones zigbee operan en la banda ISM de 2.4 Ghz a una tasa de 250kb/s con modulación O-QPSK.
MAC(Enlace 802.15.4)	IEEE	Gestiona el manejo de datos de radiofrecuencia entre dispositivos vecinos (punto a punto). El MAC incluye servicios como reintento de transmisión y gestión de reconocimiento, y técnicas de acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones, (CSMA-CA).
Red (Zigbee)		Maneja el enrutamiento que permiten que los paquetes de datos de RF pasen a través de múltiples dispositivos (múltiples saltos) desde el origen hasta destino (de punto a punto). La especificación Zigbee utiliza el protocolo de enrutamiento AODV.
Subcapa de aplicación(Zigbee)		Subcapa de aplicación que define varios objetos de direccionamiento, incluidos perfiles, clusters y puntos finales.
Objeto de dispositivo Zigbee (Zigbee)		Subcapa de aplicación que proporciona características de detección de dispositivos, servicios y capacidades avanzadas de administración de redes.

1.6. Topologías

En la especificación ZigBee, los dispositivos de red se clasifican en tres tipos: coordinador ZigBee, enrutador ZigBee y dispositivo final ZigBee. El dispositivo coordinador se encarga de formar la red, el enrutador canaliza la información entregada por los dispositivos finales y el dispositivo final transmite la información captada por los sensores.

La red ZigBee admite topologías de estrella, árbol y malla al extender el uso de la topología punto-punto. La Figura 1.3 muestra las configuraciones.

- **La topología estrella** es la más fácil de lograr. El coordinador de ZigBee es el nodo central de la red, otros dispositivos de ZigBee incluyendo los routers de ZigBee y los dispositivos finales de ZigBee requieren conectarse al coordinador de ZigBee para formar la red.
- **La topología de árbol** es más flexible en comparación con la topología de estrella. Su implementación no está limitada por el coordinador, y se puede extender mediante el uso de enrutadores ZigBee para adoptar sub-dispositivos. Los criterios para formar una red de

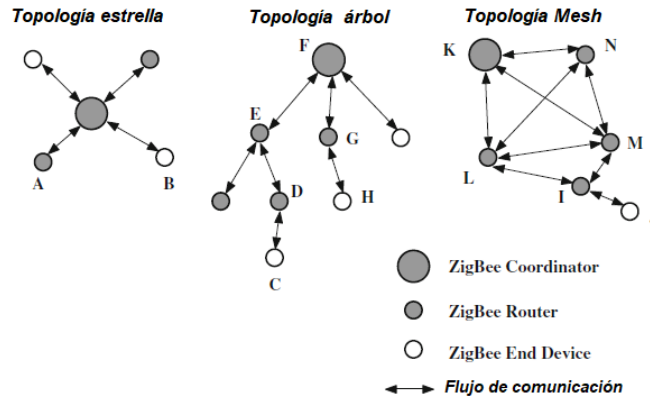


Figura 1.3: Topología Estrella, Topología de Arbol y topología malla(punto-punto)[24]

árbol son: un dispositivo final se une al árbol a través de un dispositivo enrutador, y un dispositivo enrutador se une al árbol a través de otro dispositivo enrutador (el coordinador de ZigBee también se puede usar como un dispositivo enrutador). La diferencia es que un dispositivo enrutador puede adoptar dispositivos finales u otros dispositivos enrutadores como sus sub-dispositivos, que también se llaman "hijos". Un dispositivo final no puede tener "hijos". Por lo tanto, un dispositivo final no puede ser un dispositivo padre.

- **La topología de malla(punto-punto)** tiene la misma estructura que la topología de árbol, pero sus comunicaciones de red son más flexibles. Todos los enrutadores pueden comunicarse entre sí sin necesidad de enviar mensajes al dispositivo padre (coordinador) primero.

1.6.1. La topología Digimesh

DigiMesh es una topología de red inalámbrica patentada desarrollada por los expertos en ingeniería de RF de Digi que permite la sincronización de nodos dormidos y el funcionamiento de baja potencia. Un aspecto único de DigiMesh, en comparación con otros protocolos como ZigBee es que todos los dispositivos en una red DigiMesh son del mismo tipo de dispositivo. No se requiere una arquitectura compleja para definir diferentes nodos en una red como nodos finales, enrutadores, coordinadores, enrutadores fronterizos, etc. Cada dispositivo es el mismo y es capaz de enrutar, dormir para la optimización de energía y comunicarse a través de una red de malla[26]. La figura 1.4 muestra la distribución descentralizada de los dispositivos.

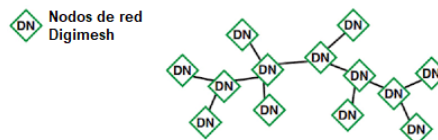


Figura 1.4: Topología digimesh[26].

1.7. Protocolos de enrutamiento

El enrutamiento forma parte de la capa de red en la red de sensores. Dependiendo de cómo el transmisor de un mensaje obtenga una ruta hacia el receptor, los protocolos de enrutamiento se pueden clasificar en tres categorías:

- Protocolos proactivos: Todas las rutas se calculan antes de que realmente se necesiten.
- Protocolos reactivos: las rutas se calculan bajo demanda, es decir, cuando se necesitan.
- Protocolos híbridos: utilizan una combinación de las dos ideas anteriores.

Dado que los nodos sensores tienen pocos recursos y la cantidad de nodos en la red podría ser muy grande, los nodos sensores no pueden permitirse el espacio de almacenamiento para tablas de enrutamiento muy grandes. Por lo tanto, los protocolos de enrutamiento híbrido y reactivo son los más adecuados en las redes de sensores[27].

1.7.1. Protocolo reactivo AODV para redes con topología Zigbee y Digimesh

El algoritmo Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) es un protocolo de enrutamiento multisalto, dinámico y de inicio automático que permite a los nodos móviles participantes establecer y mantener una red ad hoc. AODV permite que los nodos móviles obtengan rutas rápidamente para nuevos destinos y no requiere que los nodos mantengan rutas a destinos con los que no está en comunicación activa. AODV también permite que los nodos móviles respondan de manera oportuna a roturas de enlaces y cambios en la topología de la red. Hay tres tipos de mensajes definidos en AODV, solicitudes de ruta (RREQ), respuestas de ruta (RREP) y errores de ruta (RERR). Cuando se necesita una ruta a un nuevo destino, el nodo transmite un RREQ para encontrar una ruta al destino. Cada nodo que recibe la solicitud almacena en caché una ruta de regreso al transmisor de origen de la solicitud en una tabla hacia atrás, de modo que el RREP se puede transmitir desde el destino a lo largo de una ruta hacia atrás hasta ese nodo de origen. Se puede determinar una ruta cuando el RREQ llega al destino o un nodo que ofrece accesibilidad al destino. La ruta está disponible mediante la unidifusión de un RREP de regreso al origen del RREQ y la configuración de una tabla de enrutamiento en cada nodo. La Figura 1.5 ilustra la transmisión de mensajes RREQ y RREP. Para los nodos que monitorean el estado del enlace de los próximos saltos para rutas activas, se envía regularmente un mensaje HELLO para detectar una ruptura de enlace en una ruta activa, si no se recibe un ACK (Reconocimiento), el enlace está roto y se invalida. Por lo tanto, normalmente se transmite un mensaje RERR para notificar a otros nodos que se ha producido la pérdida de ese enlace. El mensaje RERR indica que el destino ya no es accesible a través del enlace roto[24].

1.8. Redes de sensores en invernaderos

Pocas áreas en el mundo disfrutan de condiciones ambientales óptimas para la producción de cultivos al aire libre durante todo el año. En la mayoría de los casos la producción se limita a un período determinado del año cuando la radiación y la temperatura son propicias para el crecimiento óptimo de las plantas. En los sistemas al aire libre el crecimiento y el rendimiento de las plantas son muy variables, ya que dependen en gran medida del entorno predominante. Para minimizar la variabilidad asociada a los sistemas al aire libre, la producción de cultivos también se lleva a cabo en sistemas de invernadero. Los sistemas de invernadero dependen en gran medida de la manipulación ambiental para lograr una alta productividad [28]. Redes de sensores se han utilizado para medir el ambiente en un invernadero usando distintos tipos de tecnologías de comunicación como LoRa, Zigbee, Bluetooth ,etc[1].

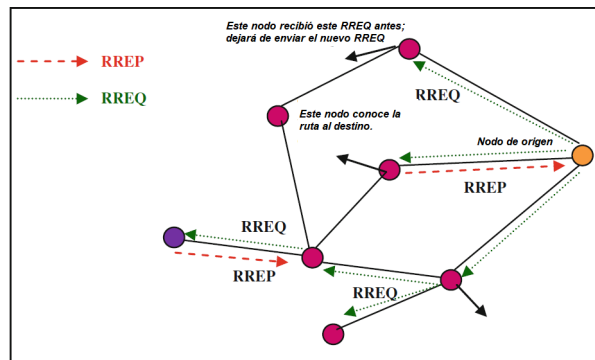


Figura 1.5: Protocolo AODV[24].

1.8.1. Factores Climáticos en Invernaderos

Los cultivos en un invernadero son afectados por las condiciones ambientales. Se suelen tener en cuenta algunos factores importantes como temperatura, humedad, nivel de dióxido de carbono e iluminación.

1.8.2. Temperatura

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y del crecimiento y desarrollo de los vegetales.

El metabolismo está profundamente afectado por los cambios de temperatura medioambiental, es complicado conocer la incidencia de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos desde un punto de vista global, dado que intervienen diferentes procesos (división celular, expansión, asimilación de carbono, respiración, distribución de asimilados) y cada uno de ellos tiene un determinado rango óptimo de temperatura, característico de la especie de cultivo que se considera, de su fase de desarrollo y de las condiciones previas de crecimiento[29].

Por ejemplo, la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de tomate se sitúa entre 18 y 27.

1.8.3. Humedad Relativa

La humedad es la cantidad de vapor de agua en el aire. La cantidad máxima de vapor de agua que se mantiene en el aire depende de la temperatura del aire (el aire más caliente contiene más agua que el aire frío) y, en menor grado, de la presión atmosférica. La humedad relativa óptima en cultivos de invernadero varía entre el 60 y 80 %.

Niveles superiores al 80 % de HR(Humedad relativa) favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas (hongos y bacterias), agrietamiento del fruto, dificultan en la fecundación, aborto de flores, entre otros. Niveles inferiores al 60 % de HR producen estrés hídrico, dificulta la fijación del polen al estigma de la flor y baja tasa de fotosíntesis.

1.8.4. Dióxido de Carbono

El contenido de carbono (C) en el tejido vegetal representa alrededor del 40 % de la materia seca. El carbono procede del dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera y se incorpora al tejido vegetal a través del proceso de la fotosíntesis, por tanto, se puede afirmar que el CO₂ es una de las principales fuentes de la fotosíntesis [29]. La concentración óptima para tomate es de

1000ppm. La concentración puede ser menor debido al consumo de las plantas de este nutriente dentro del invernadero. Relativamente a altas intensidades de luz solar y temperaturas, la tasa de fotosíntesis es directamente proporcional a la concentración de CO₂. Por lo tanto, la aplicación de este nutriente impulsa la productividad de la planta.

1.8.5. Iluminación

Diferentes cultivos prefieren diferentes niveles de luz. Si bien muchas plantas de interior tolerarán intensidades de luz tan bajas como 25 000 a 30 000 luxes, se debe maximizar la cantidad de luz que llega a la mayoría de los cultivos. Los cultivos como la rosa y el clavel prefieren condiciones de mayor luz y toleran fácilmente el pleno sol del verano al igual que los tomates y los pepinos. El entorno natural de una planta es un buen indicador de cuánta luz prefiere una planta [30].

Después de haber estudiado el comportamiento de las redes VANET y las variables ambientales a medir para la conservación de los cultivos, se procede a estudiar la estrategia de control que permita el movimiento de los nodos móviles a través del invernadero.

Capítulo 2 Modelo cinemático y diseño de control del robot móvil diferencial de dos ruedas

En este capítulo se estudia el concepto de un robot móvil diferencial y se diseña el control de movimiento del robot diferencial a través de un camino establecido.

Un robot móvil es la combinación de varios componentes físicos(hardware) y computacionales(software). En términos de componentes de hardware, un robot móvil puede ser considerado un conjunto de subsistemas de:

- Locomoción: movimiento del robot en su ambiente.
- Detección: Como el robot mide las propiedades de el mismo y su ambiente.
- Control: Acción que el robot realiza para corregir el error en función de las mediciones.

2.1. Locomoción

Es el proceso por el cual un robot o vehículo autónomo se mueve. Para poder producir movimiento, se debe aplicar fuerza al vehículo. El estudio de movimiento en donde estas fuerzas son modeladas es conocido como modelo dinámico. Mientras que el modelo cinemático estudia las matemáticas del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que afectan al movimiento. Es decir, la cinemática se ocupa de las relaciones geométricas que rigen el sistema, mientras que la dinámica incluye las energías y velocidades asociadas a estos movimientos. Para los robots móviles de ruedas las estrategias cinemáticas son suficientes para diseñar una estrategia de control. Para otro tipo de robots como los robots con patas, espaciales, acuáticos y aéreos, generalmente es necesario considerar su dinámica para el desarrollo del control. Entender como un vehículo se mueve en respuesta a sus controles es esencial para las tareas de navegación y tiene gran peso en el “dead reckoning”(estimar el camino que recorrerá el vehículo, dados los comandos que se le dan).

2.1.1. Ecuaciones de movimiento de Robot diferencial de dos ruedas

Para que todas las ruedas en contacto con el suelo rueden, el movimiento de cada una de las ruedas del vehículo debe ser a lo largo de su propio eje y . Por lo tanto, para que un robot móvil con ruedas muestre movimiento de rodadura, debe existir un punto alrededor del cual cada rueda del vehículo siga un curso circular. Este punto se conoce como el centro instantáneo de curvatura (ICC) o el centro instantáneo de rotación (ICR). Para que un vehículo cambie su ICC, debe cambiar alguna propiedad de las ruedas, como las orientaciones individuales de las ruedas con respecto a su eje vertical. En la práctica es bastante sencillo identificar el ICC porque debe estar en una línea coincidente con el eje de rodadura de cada rueda que está en contacto con el suelo(Figura 2.1).

Considerando cómo las velocidades de las ruedas de control determinan el movimiento del vehículo. En la configuración de un robot diferencial(Figura 2.1), para que cada una de las dos ruedas motrices muestre movimiento de rodadura, el robot debe girar alrededor de un punto que se encuentra en el eje común de las dos ruedas motrices. Al variar la velocidad relativa de las dos ruedas, se puede variar el punto de esta rotación y elegir diferentes trayectorias del vehículo. En cada instante en el tiempo, el punto en el que gira el robot debe tener la propiedad de que las ruedas izquierda y derecha siguen un camino que se mueve alrededor de la ICC a la misma velocidad angular ω , y por lo tanto las ecuaciones de velocidad están dadas de la siguiente forma.

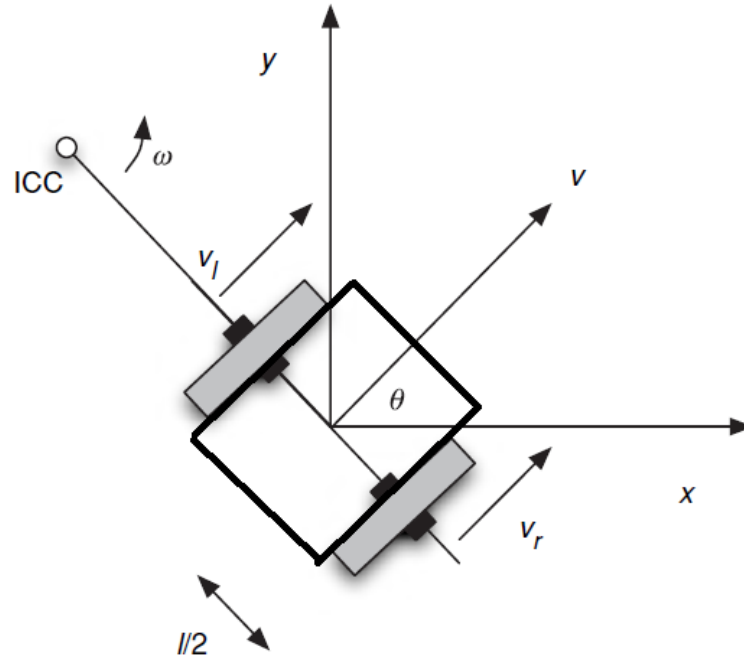


Figura 2.1: Modelo cinemático de robot diferencial [31]

$$\omega(R + l/2) = v_r \quad (1)$$

$$\omega(R - l/2) = v_l \quad (2)$$

donde

- l es la distancia entre las dos llantas
- la velocidad de la llanta izquierda y derecha están dadas por v_r y v_l respectivamente
- R es la distancia entre el centro del eje de las llantas y el ICC
- ω es la velocidad angular

Despejando se obtiene

$$R = \frac{1}{2} \frac{(v_l + v_r)}{(v_r - v_l)} \quad (3)$$

$$V = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{l} \quad (5)$$

De la ecuación (3) se observa que si la $v_r = v_l$ el radio queda indefinido y el robot se moverá en línea recta, otra observación es que $v_r = -v_l$ el radio se volverá cero y rotará en el mismo lugar sobre el punto medio de las ruedas[31].

2.1.2. Configuración en el sistema de coordenadas global del modelo cinemático del robot diferencial de dos ruedas

Dada una posición inicial en el plano (x,y) y formando un ángulo θ respecto el eje x (Figura 2.1). Su configuración en el plano está dada por lo descrito en

$$h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

La ecuación de espacio de estados que representa su movimiento esta descrita de la siguiente forma.

$$\dot{h} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\theta) \\ V \sin(\theta) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para estimar el desplazamiento del robot en tiempo discreto $t + 1$ dada una posición inicial y conociendo sus entradas, es decir, sus velocidades v_r y v_l , se debe integrar usando el método numérico de integración de Euler obteniendo la siguiente configuración. [32]

$$\begin{bmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ \theta_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V(t) \cos(\theta) \\ V(t) \sin(\theta) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \Delta t \quad (8)$$

2.2. Detección de movimiento

Una de las estimaciones de movimiento más básicas y utilizadas para los robots móviles diferenciales de ruedas es la odometría, la cual estima la distancia recorrida midiendo el número de veces que las ruedas han girado. En el caso ideal implica que se ha cubierto una distancia $2\pi r$ en el suelo para cada rotación de las ruedas con radio r . Para la odometría usualmente se utilizan encoders en los motores de las ruedas del robot diferencial.

2.3. Teoría de estabilidad de Lyapunov

Para lograr un correcto control se debe analizar la estabilidad del sistema. En esta sección se describe la teoría de estabilidad de Lyapunov para el control del robot diferencial. El análisis de estabilidad encontrando los polos y ceros de la función de transferencia está limitado a sistemas dinámicos lineales, y hay una gran cantidad de modelos matemáticos para sistemas reales que no tienen esta linealidad. Gracias a la teoría de estabilidad de Lyapunov es posible estudiar la estabilidad de sistemas no lineales [33]. Considerando una función vectorial $f(t, x)$, no lineal, puede tener múltiples puntos de equilibrio x_p , tal que $f(t, x) = 0$

$$\dot{x}(t) = f(t, x) \quad (9)$$

$$[\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dots \quad \dot{x}_n]^T = [f(t, x_1) \quad f(t, x_2) \quad \dots \quad f(t, x_n)]^T \quad (10)$$

Entonces los puntos de equilibrio x_p ocasionaran que

$$\dot{x}(t) = f(x_p) = 0 \rightarrow x(t) = c \quad (11)$$

Esto significa que el sistema dinámico es estable y alcanza la convergencia. Sin embargo, Lyapunov también considero que no todos los sistemas dinámicos podrían tener este comportamiento ideal, ya que no es tan fácil conocer los puntos de equilibrio de un sistema, su convergencia a la estabilidad dependerá de que las soluciones propuestas a los puntos de equilibrio se acercaran al punto de equilibrio deseado después de un tiempo determinado.

En la teoría de la mecánica clásica, un sistema es estable si su energía es continuamente decreciente, o sea tiene derivada negativa, hasta que el sistema alcanza un estado de equilibrio.

2.3.1. Método directo de Lyapunov

Teorema: sea $x = 0$ un punto de equilibrio del sistema $\dot{x} = f(x)$ y sea $V : D \rightarrow \mathbb{R}$ un campo escalar continuamente diferenciable definido en un dominio $D \supset \mathbb{R}^n$ que contiene el origen, entonces

- Si $V(x)$ es definida positiva ($V(x) > 0$) y $\dot{V}(x)$ es semidefinida negativa ($\dot{V}(x) \leq 0$), el origen es un punto de equilibrio estable.
- Si $V(x)$ es definida positiva y $\dot{V}(x)$ es definida negativa ($\dot{V}(x) < 0$), el origen es un punto de equilibrio asintóticamente estable.

Una función $V(x)$ que cumple con las condiciones impuestas por el teorema se le denomina función de Lyapunov. Es una gran herramienta de análisis. Sin embargo, presenta dos desventajas.

1. No hay un método sistemático para encontrar la función de Lyapunov y probar si la misma cumple con los criterios de estabilidad.
2. El teorema solo brinda condiciones suficientes, por lo que el no encontrar una función candidata de Lyapunov que satisfaga las condiciones de estabilidad o estabilidad asintótica no significa que el origen es inestable o asintóticamente estable.

2.4. Control de posición del robot móvil diferencial

Para el hacer el control se establece un punto de control a una distancia a del centro del eje de las ruedas. La configuración respecto al punto de control se observa en la Figura 2.2 y está descrito por la ecuación (12). Se observa que las variables de entrada que definen al sistema son V y ω y las salidas son los estados \dot{x} \dot{y} $\dot{\theta}$.

$$h = \begin{bmatrix} x + a\cos(\theta) \\ y + a\sin(\theta) \\ \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

La matriz en espacio de estados esta representado por la ecuación (13)

$$\dot{h} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -a\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & a\cos(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

Se desea tener un control de posición para el cual el robot móvil llegue a los puntos (x, y) dados por el usuario, entonces la matriz jacobiana característica del sistema para lograr dicha posición está dada por la ecuación (14).

$$J = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -a\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & a\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

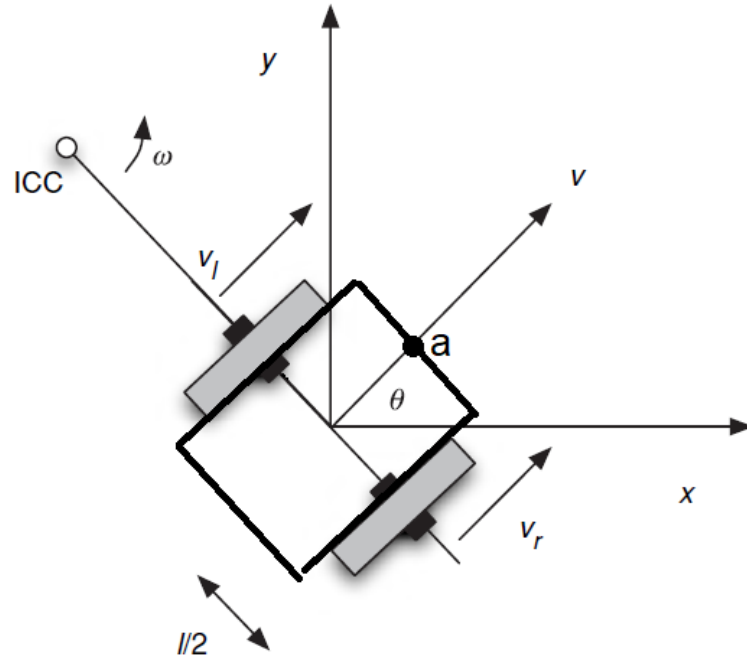


Figura 2.2: Modelo cinemático de robot diferencial con punto de control en a

$$\dot{h} = Jq \quad (15)$$

Entonces, para encontrar la ecuación de control que proporcionara las velocidades necesarias para alcanzar los puntos deseados, se aplica la inversa de la matriz característica a los estados deseados.

$$q = J^{-1}\dot{h} \quad (16)$$

Como el control será implementado en un microcontrolador en el tiempo discreto se debe tomar en cuenta el error. Entonces:

$$\dot{h}_e = \dot{h}_d - \dot{h} \quad (17)$$

Donde \dot{h}_d puede ser la posición, trayectoria o velocidad deseada a la que se debe mover el robot y \dot{h}_e es el error entre la posición actual (\dot{h}) y la deseada. Despejando y sustituyendo.

$$\dot{h} = \dot{h}_d - \dot{h}_e \quad (18)$$

$$q = J^{-1}(\dot{h}_d - \dot{h}_e) \quad (19)$$

Como los puntos deseados a donde se moverá el robot desde su posición inicial son constantes (y no una trayectoria definida) el término \dot{h}_d se elimina y la ley de control solo se determina por la siguiente expresión:

$$q = J^{-1}(-\dot{h}_e) \quad (20)$$

2.4.1. Análisis de estabilidad de Lyapunov del control de posición

Después de haber obtenido la ley de control del sistema, se procede a analizar por medio del método de Lyapunov seleccionando una Función Candidata de Lyapunov, en este caso será el error cuadrático.

$$V(h_e) = \frac{h_e^T h_e}{2} \quad (21)$$

Debido a que es el error cuadrático satisface $V(x) > 0$. Ahora se deriva la función para seguir con su análisis.

$$\dot{V}(h_e) = \frac{1}{2} \dot{h}_e^T h_e + \frac{1}{2} h_e^T \dot{h}_e = h_e^T \dot{h}_e \quad (22)$$

Para analizar de mejor forma la estabilidad se propone sustituir $\dot{h}_e = -K h_e$ entonces:

$$\dot{V}(h_e) = -h_e^T K h_e \quad (23)$$

Si el error es negativo, el valor de la función es negativo; y si es positivo, el valor del error sigue siendo negativo. Entonces la función cumple $\dot{V}(h_e) < 0$ y la ley de control es **asintóticamente estable**. Al sustituir $-K h_e$ en la ley de control original de la ecuación (20) se obtiene (24)

$$q = J^{-1}(K h_e) \quad (24)$$

$$h_e = \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (26)$$

Entonces la ley de control que nos dará las velocidades lineales y angulares deseadas queda como en la ecuación (27)

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta) & \text{Sen}(\theta) \\ -\frac{\text{Sen}(\theta)}{a} & \frac{\text{Cos}(\theta)}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (x_d - x) \\ (y_d - y) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Para calcular las posiciones a las que se mueve el robot se utiliza la integración numérica de Euler tomando en cuenta el punto de control a (ecuación(28))

$$\begin{bmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ \theta_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V(t)\text{Cos}(\theta) & -a\omega\text{Sen}(\theta) \\ V(t)\text{Sen}(\theta) & a\omega\text{Cos}(\theta) \\ 0 & \omega(t) \end{bmatrix} \Delta t \quad (28)$$

2.5. Control de camino a una velocidad constante

Se requiere que el robot diferencial se mueva a una velocidad constante a través del invernadero siguiendo un camino establecido. Siguiendo la ley de control anterior hay que interconectar distintas posiciones a seguir formando un camino. Como el que se muestra en la Figura 2.3.

Entonces sustituyendo en (19) junto con el control de posición analizado en la sección 2.4. La ley de control es descrita por la siguiente expresión

$$q = J^{-1}(\dot{p}_d + K h_e) \quad (29)$$

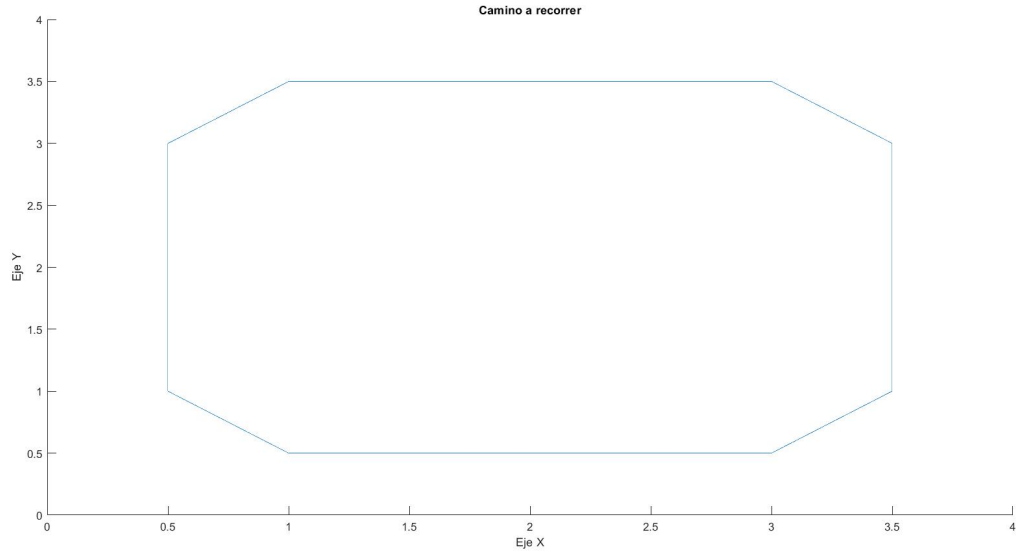


Figura 2.3: Camino a seguir en el invernadero

$$\dot{p}_d = \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \cos(\beta) \\ V_d \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\Delta p_{yd}}{\Delta p_{xd}} \quad (31)$$

Donde

- V_d es la Velocidad deseada a la que se moverá el robot
- p_{xd} y p_{yd} son los puntos en x y y deseados del camino a recorrer

2.5.1. Análisis de estabilidad de Lyapunov para seguimiento de camino a una velocidad constante

Se procede a hacer un análisis de estabilidad de Lyapunov de la ley de control. Ahora se tiene dos errores. Uno de velocidad δ_e y otro de posición h_e .

$$\delta_e = \dot{h}_d - \dot{p}_d \quad (32)$$

$$h_e = \dot{h}_d - \dot{h} \quad (33)$$

Sustituyendo 29 en 15 se obtiene

$$\dot{h} = JJ^{-1}(\dot{p}_d + Kh_e) \quad (34)$$

$$\dot{h}_d - \dot{h}_e = \dot{p}_d + Kh_e \quad (35)$$

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}_e + Kh_e \quad (36)$$

$$\dot{h}_e = \dot{\delta}_e - Kh_e \quad (37)$$

Finalmente sustituyendo 37 en 22

$$\dot{V}(h_e) = h_e^T (\dot{\delta}_e - Kh_e) \quad (38)$$

$$\dot{V}(h_e) = h_e^T \dot{\delta}_e - h_e^T Kh_e \quad (39)$$

Para que se cumpla la estabilidad ($\dot{V} < 0$) se debe conseguir la siguiente condición

$$|h_e^T Kh_e| > |h_e^T \dot{\delta}_e| \quad (40)$$

$$K > \frac{|\dot{\delta}_e|}{|h_e|} \quad (41)$$

Capítulo 3 Simulación en MATLAB del ambiente de propagación de una red de sensores inalámbricos con dos nodos VANET y un nodo fijo

En la capa física de una red LR-WPAN el estándar IEEE 802.15.4 define la sensibilidad del receptor como la más pequeña señal de potencia recibida, de tal forma que el resultado de rango de error de los paquetes recibidos sea menos del 1%. La sensibilidad de receptor especificada para una banda de transmisión de 2.4GHz es de -85 dBm, por lo que es necesario estudiar el factor de la Indicación de intensidad de señal recibida (por sus siglas en inglés RSSI).

3.1. Indicación de intensidad de señal recibida (RSSI)

La potencia de una señal inalámbrica recibida en el receptor en un espacio libre[34], está definido por la ecuación(42)

$$RSSI(d) = 10 * n * \log(d) + A \quad (42)$$

Donde:

$RSSI(d)$: es el indicador de la señal recibida.

n : es el exponente de pérdida dependiendo del ambiente de propagación [35].

d : es la distancia entre el transmisor y el receptor.

A : es el valor de RSSI medido a una distancia de 1 m.

Los dispositivos Xbee miden el RSSI en la transmisión de los datos. En términos generales, a mayor potencia de transmisión configurada en un módulo XBee, la señal transmitida es más intensa y tiene un RSSI relativamente más grande en el receptor si ambos dispositivos están dentro del rango de comunicación efectiva. Por otro lado, si la potencia de transmisión es baja, el RSSI podría ser más débil, especialmente a distancias mayores o en entornos con interferencias. El valor de A medido a 1 m de distancia entre el transmisor y el receptor configurando el Xbee con una potencia máxima de transmisión es de $A = -41dBm$, y con la mínima potencia de transmisión $A = -61dBm$.

La relación entre la potencia de transmisión y el RSSI puede variar según las condiciones del entorno y otros factores, por lo que es importante realizar pruebas y ajustes para lograr una comunicación confiable y estable en un entorno específico. En este capítulo se diseña la simulación del parámetro RSSI.

3.2. Parámetros de la simulación

La simulación se establece en un rectángulo de 8m x 4m que representa el invernadero donde posteriormente se implementara la red de sensores.

Entonces, los nodos móviles siguen un camino rectangular llegando a las posiciones descritas en la Tabla 2 implementado la estrategia de control especificada en la sección 2.4 y la el nodo receptor se coloca en el punto (7.75,2).

La Figura 3.1 muestra el esquema completo del invernadero, el camino recorrido y la estación base.

Tabla 2: Puntos que forman el camino a recorrer por el robot móvil

Nodo 1		Nodo 2	
X	Y	X	Y
1	0.5	5	0.5
3	0.5	7	0.5
3.5	1	7.5	1
3.5	3	7.5	3
3	3.5	7	3.5
1	3.5	5	3.5
0.5	3	4.5	3
0.5	1	4.5	1
1	0.5	5	0.5

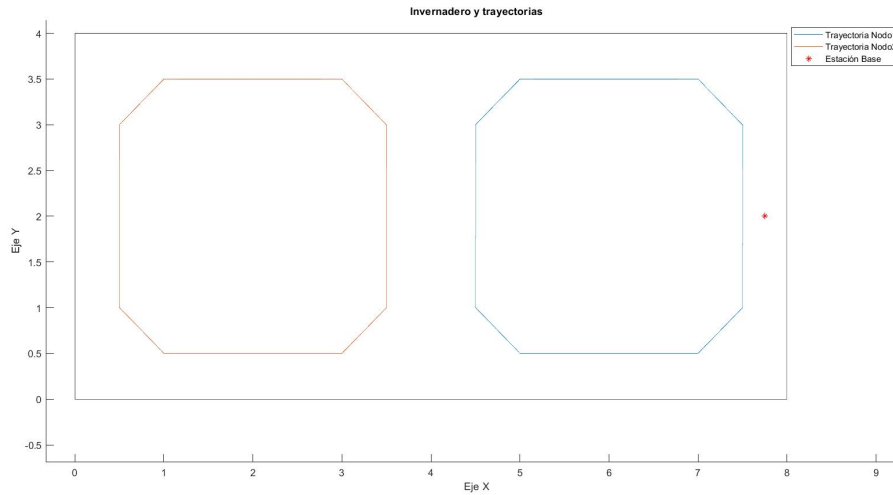


Figura 3.1: Esquema de simulación en Matlab del invernadero

Después de establecer el punto de la estación base y los puntos a recorrer por parte de los nodos móviles, se calculan las distancias d de cada punto recorrido respecto a la estación base y después se hace el cálculo de la potencia recibida con los siguientes valores:

$n = 2$ en espacio libre.

$A = -41dbm$ es el RSSI medido a 1 m de distancia en el espacio libre con la máxima potencia de transmisión y $A = -61dbm$ en el espacio libre con la mínima potencia de transmisión.

3.3. Resultados de la simulación en MATLAB

3.3.1. Simulación del control de posición

Las velocidades lineales y angulares del robot móvil 1 calculadas de acuerdo a la ecuación(27) con un valor de $K=0.1$ para ambos valores de K se muestran en la Figura 3.2.

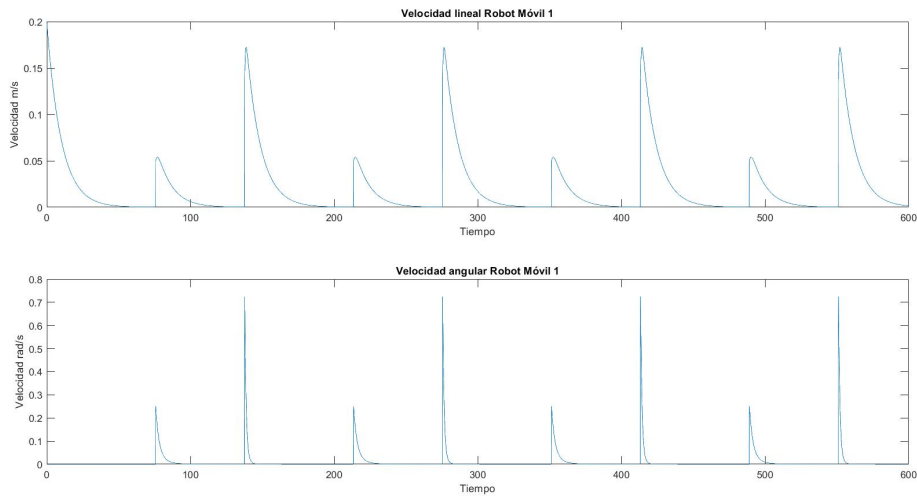


Figura 3.2: Velocidades lineal y angular en el nodo 1

Se observa unos picos de velocidad que en un sistema real no se puede implementar, pues el sistema requiere cierto tiempo de transición. Otro factor a tener en cuenta cuando el punto de posición está a punto de ser alcanzado, la velocidad disminuye demasiado. Un motor DC tiene una zona muerta, por lo que sería difícil alcanzar este control. En la siguiente sección se resuelve este problema.

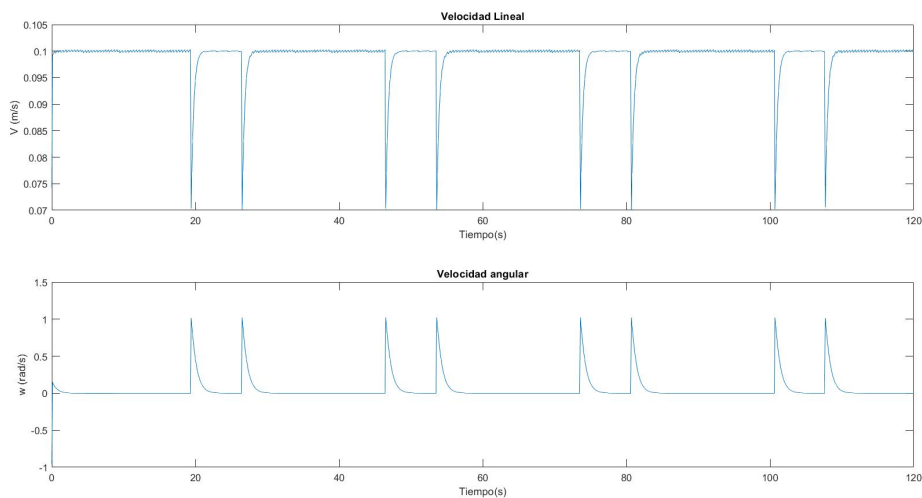


Figura 3.3: Velocidades lineal y angular del seguimiento de camino a una velocidad constantes

3.3.2. Simulación de control de seguimiento de camino a una velocidad constante

Debido a la problemática anterior se implementa la simulación de seguimiento de camino manteniendo los valores de $K=0.1$ con una velocidad constante de 0.1 m/s de acuerdo a la

ecuación (29) y los resultados de la velocidad lineal y angular se observan en la Figura 3.3. Se aprecia que el control de velocidad va siendo continuo a diferencia de la Figura 3.2. La condición de $K > \frac{|\dot{\delta}_e|}{|h_e|}$ estudiado en 2.5.1 para estabilidad se cumple cuando el error es grande, pero cuando el valor es cercano a 0 se observan oscilaciones (Figura 3.4) lo que implica inestabilidad. Si el error es relativamente pequeño, estas oscilaciones no tienen efectos significativos en el sistema y el control es adecuado para la implementación física del robot.

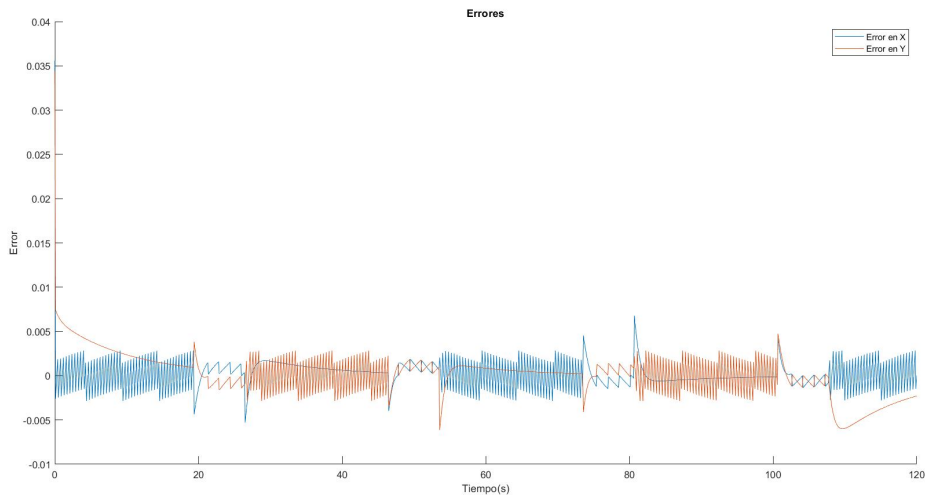


Figura 3.4: Errores en X y Y del camino recorrido

3.3.3. Valores de RSSI de diferentes puntos de los caminos recorridos por los dos nodos VANET

Los resultados de la simulación del factor RSSI se muestran en la Figura 3.5. Se toman las diferentes distancias que va teniendo cada nodo móvil respecto a cada nodo receptor con un tiempo de muestreo de 0.1 s, si el nodo móvil va a una velocidad de 0.1 m/s, entonces se registran los valores RSSI obtenidos cada 10 cm. Se observa que mientras más se alejan los nodos móviles de la estación base, la potencia recibida decrece.

Es importante la estimación de la potencia recibida para asegurar de forma exitosa la recepción de los datos. En el modelo propuesto para esta simulación se aprecia que a una distancia de hasta 3 metros se garantiza la sensibilidad de $-85dBm$ especificada por el estándar IEEE 812.15.4. Estos valores corresponden a lo reportado en la literatura como lo requerido para una buena comunicación [25].

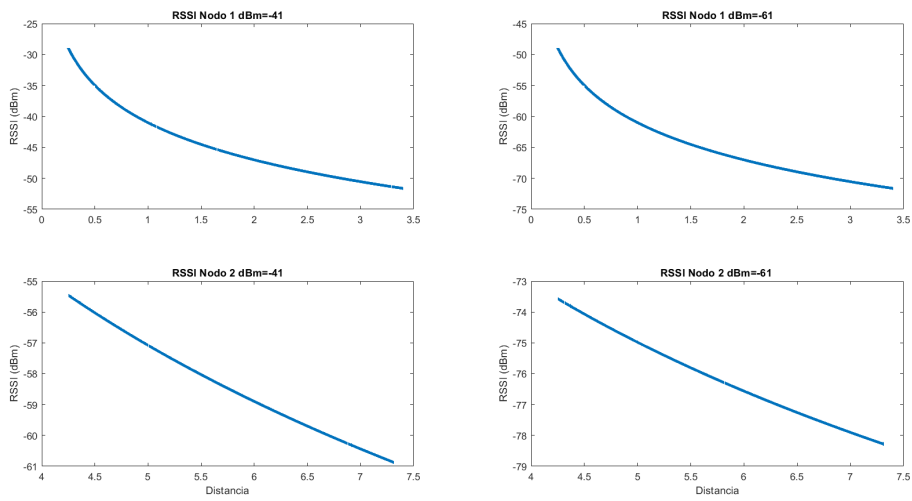


Figura 3.5: Factor RSSI de la estación base respecto a los diferentes puntos recorridos por los nodos VANET

Capítulo 4 Implementación de la Red VANET con dos nodos móviles

4.1. Hardware

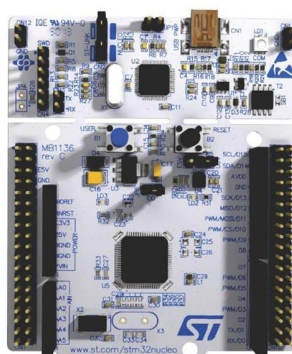
A continuación se describe el hardware del sistema con el cual se medirán las variables ambientales en el invernadero, en la sección se muestra la integración del hardware y mediciones hechas por los sensores.

4.1.1. Microcontrolador STM32L476RGT

La familia STM32 de microcontroladores de 32 bits basados en el procesador Arm Cortex-M está diseñada para ofrecer nuevos grados de libertad a los usuarios de microcontroladores. Ofrece productos que combinan un rendimiento muy alto, capacidades en tiempo real, procesamiento de señales digitales, operación de baja potencia/ baja tensión y conectividad, al tiempo que mantiene la integración completa y la facilidad de desarrollo.

La gama de microcontroladores STM32, basada en la estandarización de Arm Cortex M, viene con una amplia selección de herramientas y software para apoyar el desarrollo de proyectos, lo que hace que esta familia de productos sea ideal para pequeños proyectos y plataformas de más amplias y complejas[36].

La serie STM32L4 ofrece la excelencia de la plataforma de ultrabaja potencia de ST con una dimensión de rendimiento adicional al proporcionar instrucciones DSP y unidad de punto flotante (FPU), más memoria (hasta 1 Mbyte de memoria Flash) y características innovadoras.



- DAC de 12 bits.
- Interfaces de comunicación 5 USART, 3 I2C, 3 SPI.

4.1.2. Módulo inalámbrico de transmisión y recepción de datos Xbee S2C

El XBee S2C (Figura 4.2) es un módulo de bajo costo que permite realizar conexiones inalámbricas entre dispositivos electrónicos. Trabaja con una frecuencia de 2.4Ghz y permite crear redes de conexión punto a punto, punto a multipunto y mesh. Características del modulo Xbee S2C. Los módulos Xbee también pueden ser configurados para que operen con las topologías Zigbee o digimesh (véase sección 1.6) para su comunicación.

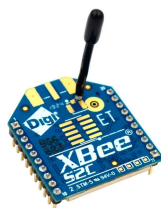


Figura 4.2: Módulo de comunicación inalámbrica S2C

- Frecuencia de trabajo: 2.4 GHz.
- Velocidad de datos (máx.): Hasta 250.000b/s.
- Técnica de modulación: DSSS.
- Rango de señal: Hasta 1200 metros.
- Sensibilidad: -100 a -102 dBm.
- Voltaje de la fuente: 2.1 V 3.6 V.
- Corriente – Transmisión: 28 a 31 mA.
- Interfaz de comunicación: SPI, UART.
- Capacidad de memoria: 32kB Flash, 2kB RAM.
- Temperatura de operación: -40°C 85°C.

4.1.3. Puente H L298N

El driver puente H L298N es el módulo más utilizado para manejar motores de DC de hasta 2 amperios. El chip L298N internamente posee dos puentes H completos que permiten controlar 2 motores de DC o un motor paso a paso bipolar/unipolar.

El módulo permite controlar el sentido y velocidad de giro de motores mediante señales TTL que se pueden obtener de microcontroladores y tarjetas de desarrollo. El control del sentido de giro se realiza mediante dos pines para cada motor, la velocidad de giro se puede regular haciendo uso de modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés). La Figura 4.3 muestra el puente h.

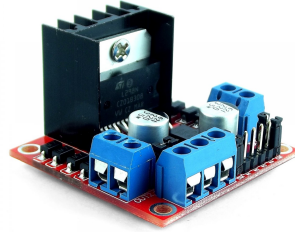


Figura 4.3: Puente H L289

4.1.4. Sensor de CO2

El sensor SenseAir K30 (Figura 4.4) es un sensor de dióxido de carbono con tecnología *NDIR* de gran rango y precisión con dos salidas analógicas y dos digitales, además cuenta con protocolos de comunicación *I²C* y *UART(MODBUS)*. Estas características lo hacen compatible con gran cantidad de dispositivos digitales.

El sensor Senseair K30 se utiliza para medir los niveles de concentración de CO2 en el ambiente, es del tipo infrarrojo no dispersivo, este tipo de sensores son los más comunes para medir CO2. Funciona mediante una luz infrarroja que dirige las ondas de luz a través de un tubo que contiene la muestra de aire a medir. El aire se mueve hacia un filtro óptico donde las moléculas de CO2 absorben la luz infrarroja frente a un detector de luz IR. El detector de luz IR mide la cantidad de luz IR filtrada y con esta medida se obtiene la concentración de CO2.



Figura 4.4: Sensor de CO2 senseair k30

- Rango de medición CO2: 0 a 5,000 ppm.
- Precisión: ± 30 ppm.
- Rango de temperatura de operación: 0 a 50 °C.
- Comunicación Serial: Uart (Modbus).
- Las salidas disponibles son :

Out1 (Analógica): 0 a 4 VDC = 0 a 2,000 ppm.

Out2 (Analógica): 1 a 5 VDC = 0 a 2,000 ppm.

Out3 (Digital): 700/800 ppm.

Out4 (Digital): 900/1,000 ppm.

4.1.5. Sensor de Temperatura y Humedad DHT22

El sensor DHT22 (Figura 4.5) permite monitorear temperatura y humedad relativa de forma precisa y sencilla a un bajo precio. La salida suministrada es de tipo digital de una sola línea, por lo cual no se necesita un convertidor analógico-digital para muestrear los datos. Esta característica lo hace robusto para sistemas digitales como arduino, microcontroladores STM32 o una tarjeta *SoC(System on Chip)* Rasperry Pi. Una ventaja de este dispositivo es que se puede comunicar a través de una sola línea de datos. Algunas de sus características importantes son

- Voltaje de Operación: 3V - 6V DC.
- Rango de medición de temperatura: -40°C a 80 °C
- Precisión de medición de temperatura: ± 0.5 °C.
- Resolución Temperatura: 0.1°C.
- Rango de medición de humedad: De 0 a 100 %RH.
- Precisión de medición de humedad: 2 %RH.
- Resolución Humedad: 0.1 %RH.
- Tiempo de sensado: 2s.
- Interface digital: Single-bus (bidireccional).

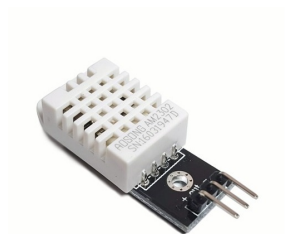


Figura 4.5: Sensor de Temperatura y humedad DHT22

4.1.6. Sensor de Luz BH1750

El Módulo BH1750 es un sensor de iluminación digital para medición de flujo luminoso (iluminancia). Componente que posee, dentro de su arquitectura interna, un conversor análogo digital (ADC) de 16 bits con una salida digital de formato I2C, que facilita la integración con microcontroladores o sistemas embebidos diversos. Este módulo entrega la intensidad luminosa directamente en unidades de Lux que es equivalente a $Lumen/m^2$.

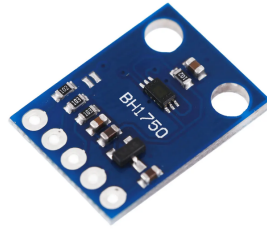


Figura 4.6: Sensor de luz BH1750

- Voltaje de operación: 2.4 VDC – 3.6 VDC.
- Consumo promedio: 140uA - 199uA.
- Interfaz Digital: I2C. Rango y Resolución: 1 - 65535 Lux (16 bits). Respuesta espectral similar a la del ojo humano.
- Temperatura de operación: Desde -40o C hasta 85o C.
- Frecuencia máxima de transmisión: 400KHz.

4.1.7. Sensor de movimiento MPU6250

El MPU6050 Acelerómetro y Giroscopio de 6 Ejes Digital es una IMU (unidad de medición inercial), que es un dispositivo electrónico capaz de medir fuerzas como la aceleración y velocidad, así como la orientación gravitacional, son muy utilizados en la tecnología moderna, todos los vehículos móviles no tripulados cuentan con una, además es indispensable en sistemas de navegación.

Este dispositivo incluye un acelerómetro de 3 ejes (capaz de medir aceleración) y un giroscopio de 3 ejes (velocidad angular) en un solo circuito integrado. Además, incluye la tecnología Digital Motion Processor (DMP), un “coprocesador” de movimiento que permite ejecutar algunos algoritmos esenciales y reducir la carga en el procesador principal, todo esto en un pequeño encapsulado tipo QFN.



Figura 4.7: Sensor con acelerómetro y giroscopio MPU6050

- Voltaje de operación correcta: 3.3v a 5v.
- Protocolo de comunicación: I2C.
- Contiene 6 Grados de libertad.

4.1.8. Integración del Hardware

En el chasis metálico se integra el hardware y se obtiene el nodo VANET mostrado en la Figura 4.8a. En el apartado de apéndice se muestra de mejor manera el diagrama esquemático.

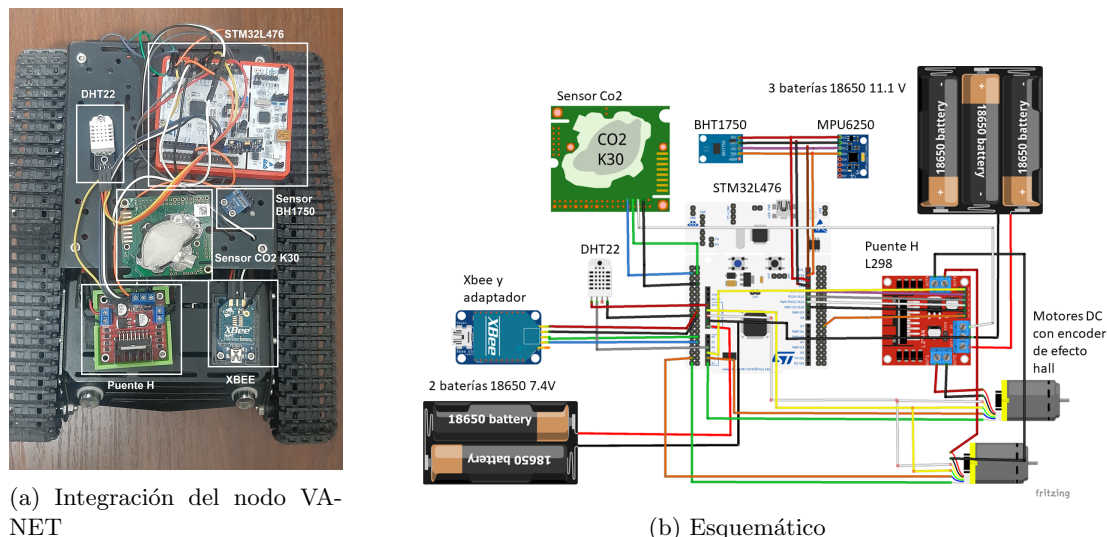


Figura 4.8: Nodo sensor VANET

4.2. Control de los motores DC del Robot diferencial

El control de velocidad de seguimiento de camino del robot móvil diferencial calcula las velocidades (V , ω) con las que el robot debe moverse para alcanzar su punto de referencia. El robot diferencial necesita ser movido por dos motores de DC. Se debe obtener el control PID que proporcione las velocidades necesarias para que el algoritmo de control de navegación opere adecuadamente. Durante muchos años, los controladores PI y PID han sido utilizados en una amplia variedad de industrias. La importancia de estos controladores ha sido respaldada por su larga trayectoria, donde los métodos de ajuste se han revelado como elementos clave para lograr un desempeño confiable y consistente. Es por ello que se han desarrollado numerosos métodos de ajuste, especialmente dirigidos a modelos de proceso como los de primer orden con retardo, los cuales son capaces de representar de manera adecuada el comportamiento de una amplia gama de procesos. Algunos métodos clásicos de sintonización, como los propuestos por Ziegler-Nicholsy Cohen-Coon y PID Lambda continúan siendo fundamentales en múltiples aplicaciones industriales [37]. La Figura 4.9 muestra la relación entre el control de camino y el control de velocidad de los motores de DC. El primer paso para lograr el control PID es obtener la función del motor en lazo abierto, después se aplica un método de sintonía para controlar la velocidad en lazo cerrado y finalmente se hacen los ajustes necesarios para obtener una sintonía fina.

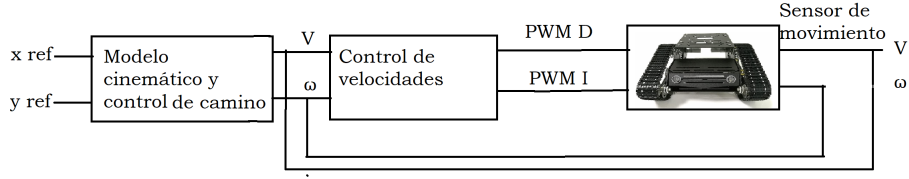


Figura 4.9: Etapas de control

4.2.1. Identificación de los parámetros del motor con entrada en lazo abierto

El motor alcanza una velocidad de 16 rad/s, se limita a una velocidad máxima de 11 rad/s para poder controlar de mejor manera el motor. Con el objetivo de identificar los parámetros del motor se introduce a la entrada una señal PWM con valor de 30 % del ciclo de trabajo y se muestrea su salida a 0.1 s. La Figura 4.10 muestra el resultado obtenido, de estos datos se obtiene los valores de la función de transferencia (ecuación 43).

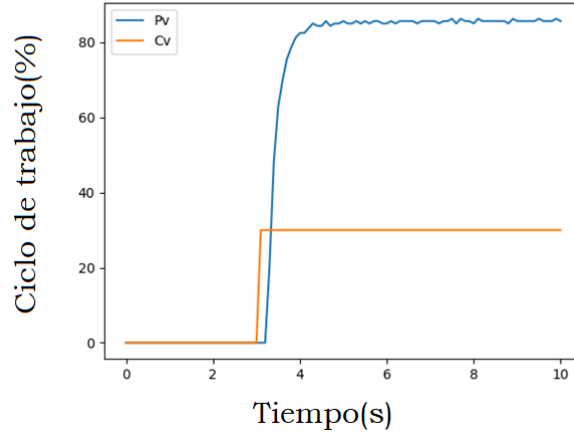


Figura 4.10: Respuesta de motor a un escalón en lazo abierto

$$H(s) = \frac{\omega_{rueda}(s)}{E(s)} = \frac{K}{sT + 1} e^{-sL} = \frac{2,4886}{0,2057s + 1} e^{-0,14s} \quad (43)$$

4.2.2. Sintonía lambda del sistema en lazo cerrado

Para la obtención del diseño PID, se utiliza la sintonía tipo lambda: Considere la función de transferencia PID serie o interactuante [37].

$$C'(s) = K'_p \frac{(1 + sT'_i)(1 + sT'_d)}{sT'_i} \quad (44)$$

Donde:

- K'_p es la Ganancia Proporcional

- T'_i es el Tiempo Integral
- T'_d es el Tiempo Derivativo

$$K'_p = \frac{T}{K(L/2\lambda)} \quad T'_i = T \quad T'_d = \frac{L}{2} \quad (45)$$

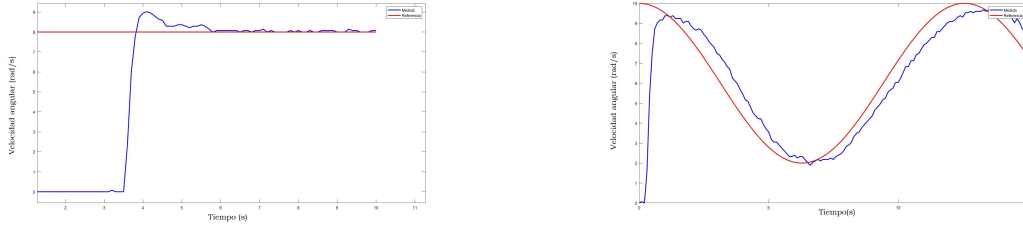
Se normalizan las constantes PID

$$K_p = K'_p \frac{T'_i + T'_d}{T'_i} \quad T_i = T'_i + T'_d \quad T_d = \frac{T'_i T'_d}{T'_i + T'_d} \quad (46)$$

Entonces

$$K_p = 0,1240 \quad T_i = 0,2757 \quad T_d = 0,0522 \quad (47)$$

Estas constantes se utilizan para implementar un control de lazo cerrado por medio del microcontrolador. Obteniendo las siguientes respuestas.



(a) Respuesta a la señal de entrada escalón

(b) Respuesta a la señal de entrada coseno

Figura 4.11: Respuesta del sistema en lazo cerrado

Con una entrada escalón se obtiene un buen resultado, pero en el caso de una función de trayectoria tipo coseno no se logra un buen resultado (Figura 4.11), por tal motivo se procede a hacer una sintonía fina que logre seguir la función de trayectoria adecuadamente ya que el control en tiempo real debe ser lo suficientemente rápido para seguir la señal de referencia y que el motor no se desfase de la señal de control, pues esto causaría una inestabilidad en el control de camino. El ajuste de los valores PID se realiza empíricamente con valores cercanos obtenidos en (47). Los valores obtenidos que mejor siguen la señal coseno son:

$$K_p = 0,15 \quad T_i = 0,17 \quad T_d = 0,084 \quad (48)$$

Este control de velocidad angular de los motores DC será implementado en conjunto con el control de velocidad de camino.

4.3. Implementación control de seguimiento de camino

Se integra el control de camino con velocidad constante con el control de los motores DC para poder localizar y mover el robot móvil diferencial a través de un camino (véase Figura 4.9). Las ecuaciones que relacionan las velocidades globales con las velocidades angulares de los motores son descritas por las ecuaciones (49 y 50)

$$\omega_{ruedaD} = \frac{V}{R_{Rueda}} + \frac{l * \omega}{2R_{Rueda}} \quad \omega_{ruedaI} = \frac{V}{R_{Rueda}} - \frac{l * \omega}{2R_{Rueda}} \quad (49)$$

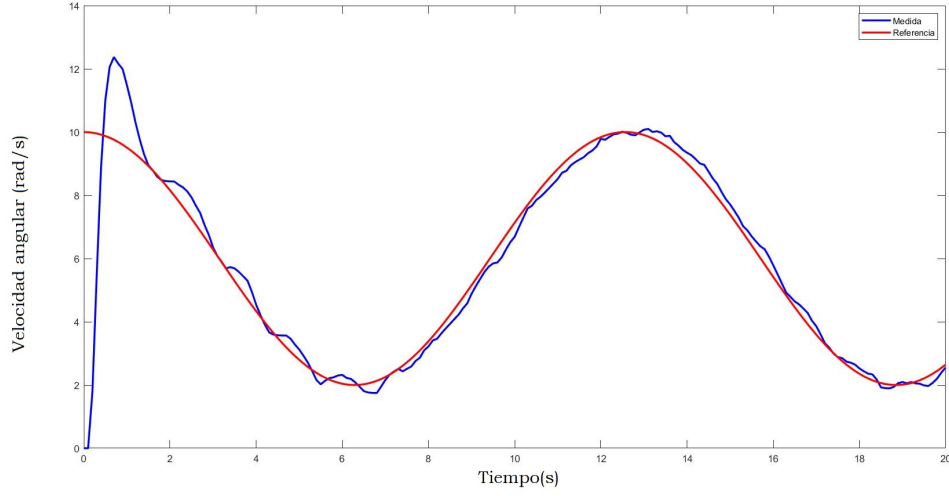


Figura 4.12: Respuesta a la señal coseno con sintonía fina

$$V = R_{llanta} \frac{\omega_{RuedaD} + \omega_{RuedaI}}{2} \quad \omega = R_{llanta} \frac{\omega_{RuedaD} - \omega_{RuedaI}}{l} \quad (50)$$

- ω_{ruedaD} es la velocidad de la rueda derecha del robot móvil.
- ω_{ruedaI} es la velocidad de la rueda izquierda del robot móvil.
- R_{Rueda} es el radio de ambas ruedas
- V y ω son las velocidades lineal y angular estudiadas en la sección 2
- l es la longitud de separación entre las dos llantas del robot móvil diferencial.

Implementando el algoritmo de control de velocidad junto con el control PID, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1s se obtienen el seguimiento de camino con una velocidad constante (Figura 4.13). El control sigue las velocidades de referencia, aunque tiene ciertas diferencias con la simulación (Figura 3.3) por los obstáculos que hay en el camino, el control logra seguir el camino establecido. Por otro lado, el error se mantiene en un umbral cercano a 0 similar a la simulación realizada en la sección 3.3.2. Los resultados del movimiento son adecuados para implementarlo en el invernadero con dos robots móviles.

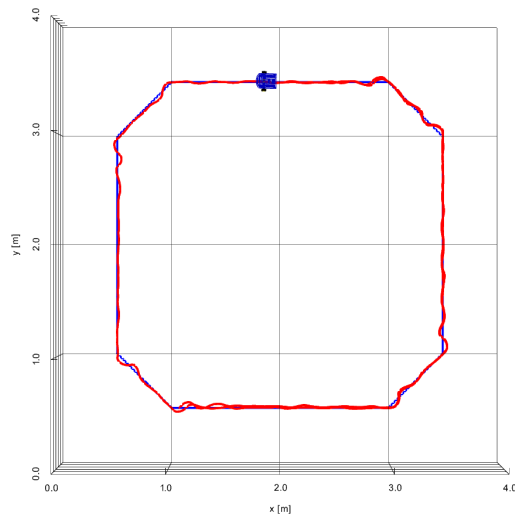


Figura 4.13: Camino recorrido por el robot

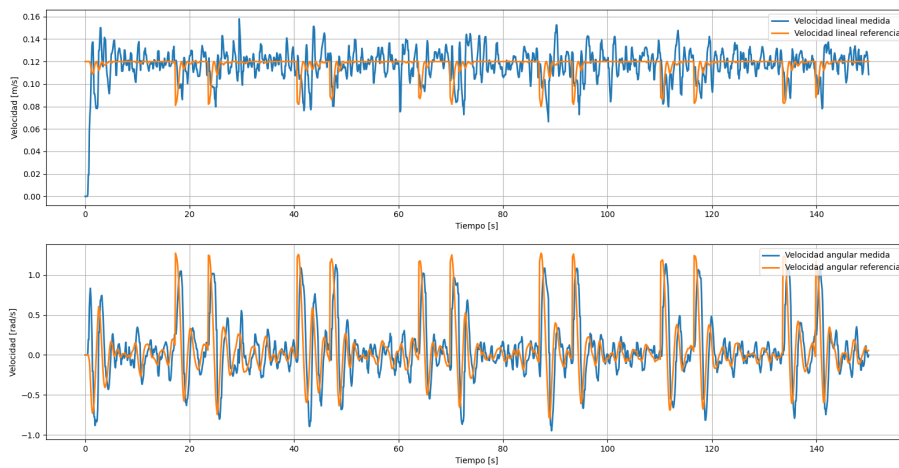


Figura 4.14: Velocidades lineal v y angular ω del robot diferencial

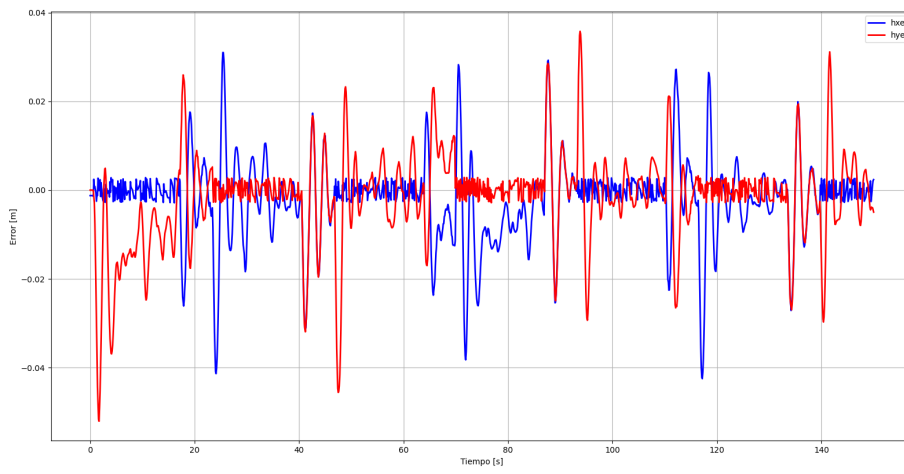


Figura 4.15: Evolución del error

Capítulo 5 Resultados de la implementación de la red VANET con dos nodos móviles: mediciones de RSSI y variables ambientales

5.1. Configuración de la red VANET

Los módulos xbee se configuran en el software XCTU de la empresa Digi para definir los parámetros de los nodos individuales de la red. La Figura 5.1 muestra la configuración realizada para comunicar los nodos. Los nodos $XBEE_B$ y $XBEE_C$ transmiten información al nodo $XBEE_A$ que es el que recibirá la información y la almacenará para su análisis. Los nodos se comunican a una velocidad de 115200 bauds y la topología de comunicación se establece en modo digimesh. De esta manera, cada nodo sensor puede funcionar como transmisor, receptor y enrutador de datos. El microcontrolador envía los datos medidos, RSSI o variables ambientales, a través de comunicación UART.

Parámetro	XBEE_A	XBEE_B	XBEE_C	
ID	D161	D161	D161	Define la dirección de la red
DH	13A200	13A200	13A200	Define la dirección de destino (Parte alta)
DL	41BEE25A	412583D0	412583D0	Define la dirección de destino (Parte baja)
NI	XBEE_A	XBEE_B	XBEE_C	Identificador del nodo

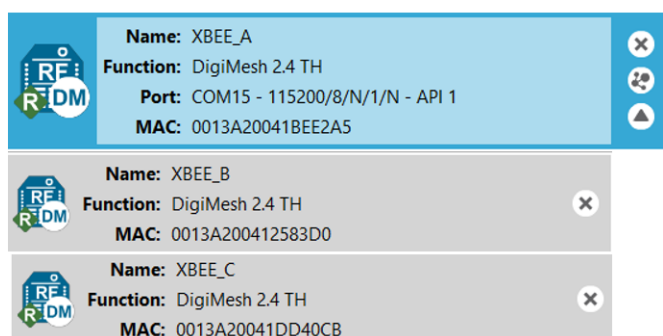


Figura 5.1: Configuración de los nodos para formar la red

Para la medición de las variables ambientales se configuran los módulos xbee en modo API y se transmiten trama de datos(frame) para la transmisión y recepción de datos. El modo API es útil porque permite observar información de la red como dirección del nodo destino o el nodo que envía la información, el tipo de información (transmisión, recepción, rssi, etc). Para iniciar el experimento de medición se envía una trama de tipo transmisión como la que se muestra en la Tabla 3

Tabla 3: Trama de datos API para transmisión de datos

Byte	0	1	3	4	5	13	15	16	17-n	
Campo	Delimitador	Largo	Tipo	ID	Dirección de nodo destino	Reservado	Radio de transmisión	Opciones de transmisión	Datos	Checksum

Donde:

- Delimitador(1 byte) indica el inicio de una trama API (0x7E).
- Largo (2 bytes) Indica la longitud de byte en la trama.
- Tipo (1 byte) El tipo de trama de datos, en este caso: transmisión 0x10.
- ID (1 byte) Establece si el dispositivo que recibe el dato debe dar una respuesta de estado(por ejemplo:Successful-recepción exitosa).
- Dirección del nodo destino (64 bits).
- Reservado (2 bytes). Usualmente con 0xFFFE.
- Radio de transmisión (1 byte)Establece el número máximo de saltos que puede atravesar una transmisión de múltiples saltos.
- Opciones de transmisión (1 byte). No se ocupa ya que solo se requiere transmitir datos.
- Datos a transmitir (n-bytes) información a transmitir al nodo destino.
- Checksum (1 byte) Byte para detectar cambios accidentales en una secuencia de datos para proteger la integridad de estos.

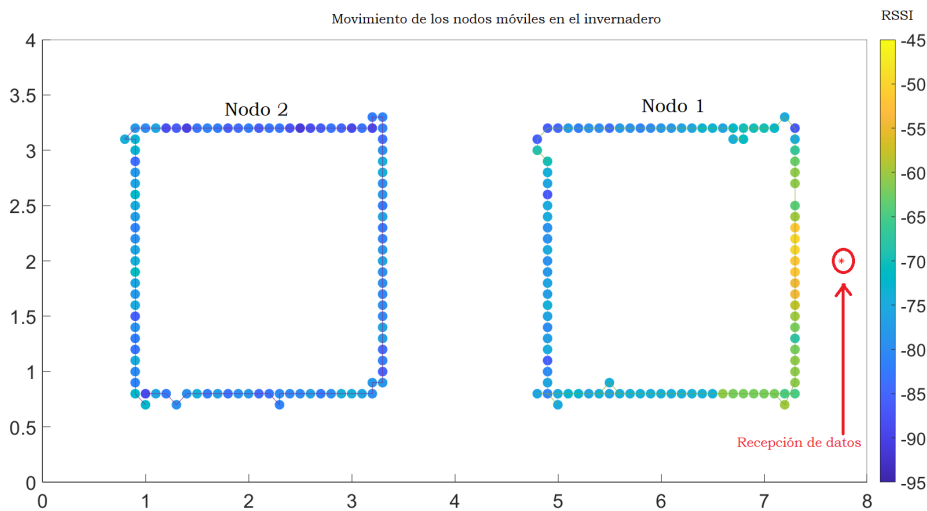


Figura 5.2: Medición del nivel RSSI en el invernadero con antena receptora a nivel del suelo

5.2. Medición de RSSI para validar resultados del modelo de propagación

Todas las comunicaciones del experimento se hacen a través de tramas API de Xbee. Una vez que se envía la trama desde el XBEE A con el paquete de datos indicando la velocidad constante del robot a 0.1m/s, los dos nodos móviles destino reciben el dato y comienza a moverse en el invernadero obteniendo las mediciones ambientales. En la Figura 5.2 se observa el cambio de la potencia de señal recibida RSSI conforme al vehículo móvil se va moviendo. El punto rojo(7.75,2) representa la ubicación del módulo Xbee que recibe los datos. El nodo 1 tiene mejor calidad en la

transmisión debido a la cercanía con el nodo receptor, mientras que en el nodo 2 va decayendo conforme se va alejando. Es importante resaltar que en los puntos más alejados del nodo 2 con respecto al nodo receptor la transmisión mejora, esto se debe a que el protocolo AODV proporciona la información al nodo destino a través del nodo 2, esta es la gran ventaja de usar el protocolo digimesh con los dispositivos xbee.

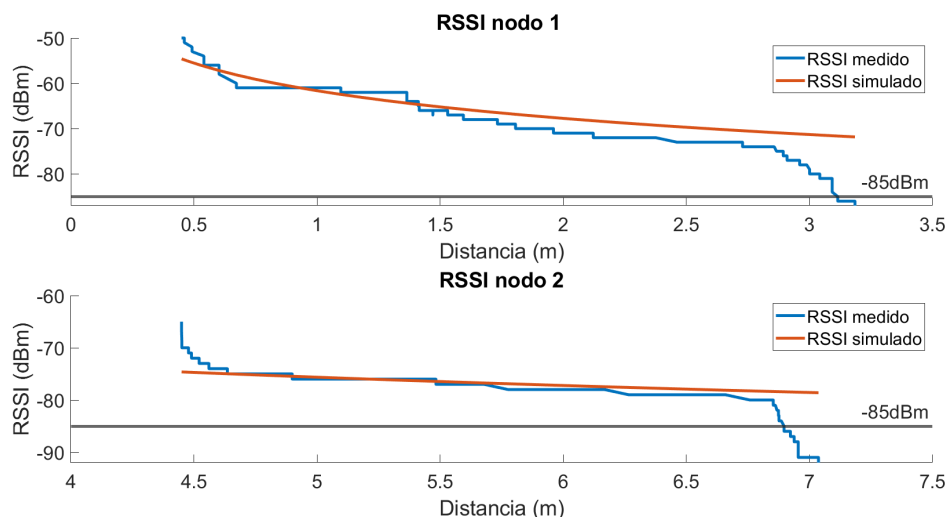


Figura 5.3: Gráfica de RSSI vs Distancia con respecto al nodo receptor

La Figura 5.3 muestra el valor de medido RSSI (línea azul) comparándolo con lo simulado en el capítulo 3.3.3 (línea roja) con un valor de $n = 2$ debido a que el espacio es libre y con $A = -61dBm$ configurando el xbee con la potencia de transmisión más baja (-5dBm). Los resultados muestran que para nodo 1 y 2 los valores decaen mucho cuando están más alejados, pero esto se debe a la posición en que las antenas se encuentran. Debido a que las antenas integradas "wire" de los módulos Xbee son muy cortas, al momento que el nodo móvil queda de espaldas al nodo receptor, la superficie de metal del chasis del móvil aparece como impedimento para la transmisión de la señal, por lo cual esta misma decae. De este análisis del RSSI se concluye que la posición de la antena receptora necesita estar a una altura que le proporcione una línea de mira mejor respecto a los nodos móviles y reciba los datos de manera adecuada para que no tenga obstáculos en el momento de recibir los datos. En este experimento se encontraba al nivel del suelo, entonces se procedió a realizar el mismo experimento del movimiento, pero con la antena a una altura mayor y aumentando también la potencia de transmisión (ahora con 5 dBm que es la máxima en Xbee s2c) de los nodos móviles y un valor $A = -41dBm$ correspondiente a lo medido empíricamente a 1 m. De esta nueva configuración para el experimento se obtuvieron los resultados de las Figuras 5.4 y 5.5.

El nivel de recepción de los datos mejora en su RSSI, esto se debe a que la antena receptora tiene una línea de mira mejor con respecto a los nodos móviles por su altura, además se usa una potencia más grande para transmitir los datos, esto con el fin de lograr mejorar la comunicación. Los cambios repentinos en la transmisión se debe a la interferencia del cuerpo del nodo móvil que actúa como un obstáculo. Entonces se han estudiado los dos casos cuando a) la potencia de transmisión es la más baja y el nodo receptor de los datos esta a nivel del suelo y b) cuando la

potencia de transmisión es la más alta y la altura de la antena receptora es mayor que el nivel al que se encuentra los nodos móviles, por lo cual hay una mejora en la recepción de los datos.

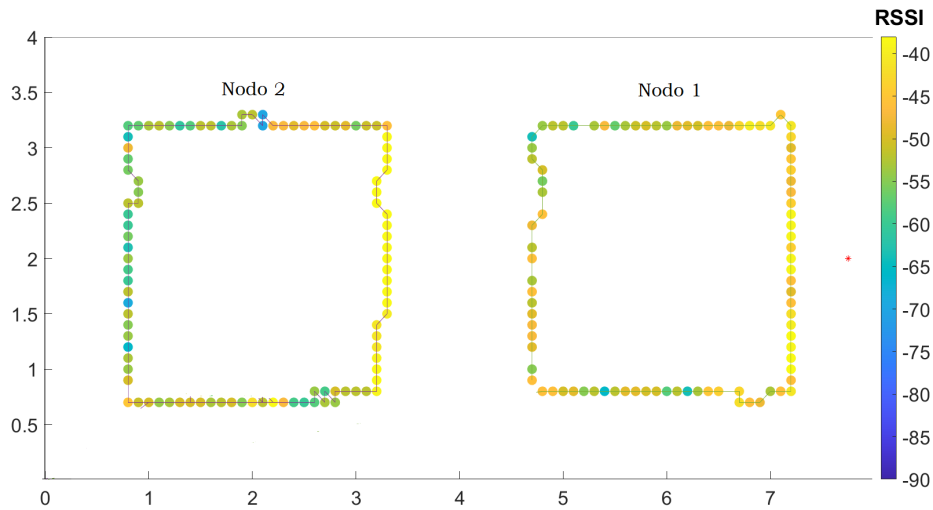


Figura 5.4: Medición del nivel RSSI en el invernadero con antena receptora a 90cm del suelo

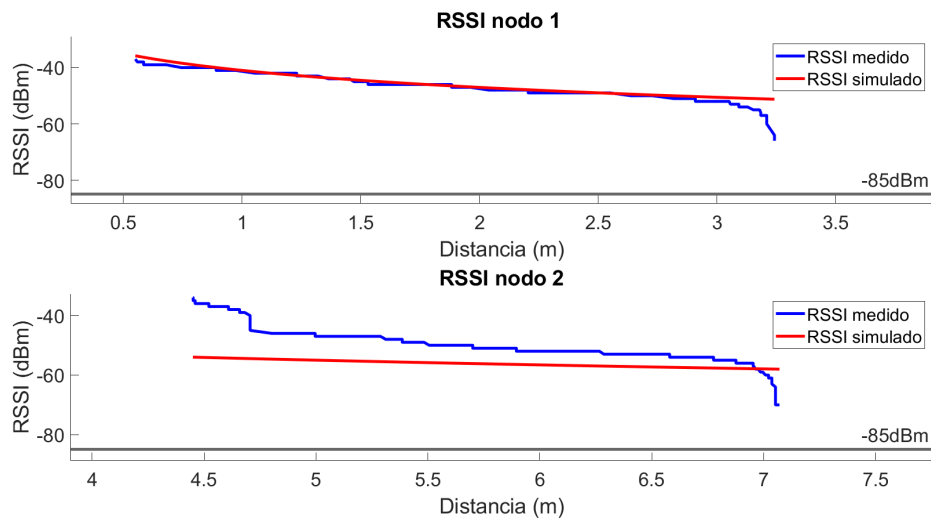


Figura 5.5: Gráfica de RSSI vs Distancia con respecto al nodo receptor con una altura de 90cm

5.3. Medición de variables ambientales con dos nodos VANET

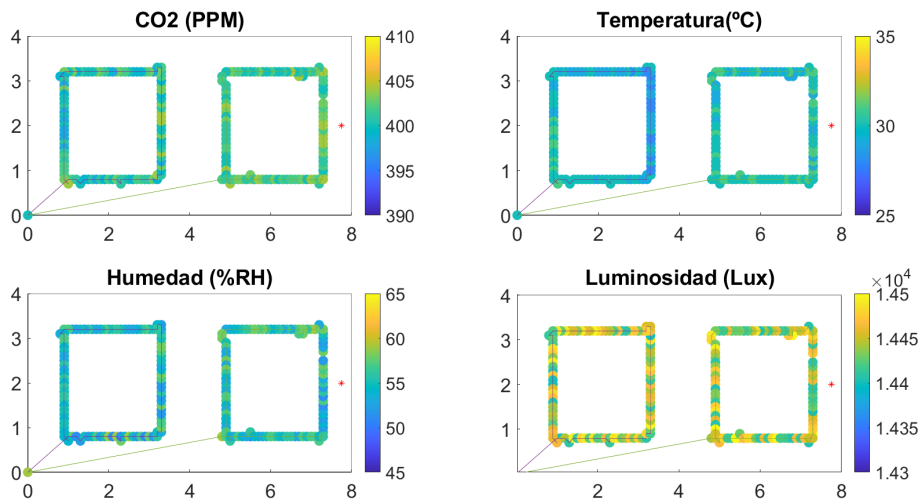


Figura 5.6: Medición de los parámetros ambientales

Finalmente, se obtienen los datos ambientales. Una vez que se envía la trama con el paquete de datos indicando la velocidad constante del robot a 0.1 m/s, los dos nodos destino reciben el dato y comienzan a moverse en el invernadero obteniendo las mediciones ambientales. Los resultados se muestran en la Figura 5.6. Los niveles de CO2 se mantienen en 400ppm, la temperatura tiene un promedio de entre 29 °C y 30 °C debido a la estructura cerrada del invernadero, la humedad relativa tiene valores de alrededor del 57% y la luminosidad va variando debido a la sensibilidad del sensor, pero mantiene un promedio de 14,000 luxes. Estos parámetros podrían ser controlados a través de diversos actuadores para mantenerlos dentro de los rangos requeridos. El nodo móvil nos proporciona la información en varios puntos del espacio en el invernadero para comprobar que el ambiente es homogéneo y esta es la principal ventaja de usar nodos sensores móviles respecto a nodos sensores estáticos, ya que estos últimos solo proporcionan información de un área limitada.

Conclusiones

En este trabajo se implementó una red VANET para medir las variables en un invernadero. La gran ventaja de usar estas redes es la movilidad, la cual puede ser explotada en lugares donde se requiere obtener información relacionada con el ambiente y el espacio donde estas redes operan. En el caso del invernadero, son de utilidad para cubrir un espacio donde se podría usar varios nodos para medir el ambiente con pocos nodos, para esto fue necesario establecer los protocolos de transmisión de datos y las técnicas de movilidad que lograran un adecuado funcionamiento de la red VANET. Se usaron redes de bajo rango de transmisión de datos (LR-WPAN) para minimizar el consumo energía y siguiendo las normas del estándar IEEE 802.15.4. Los dispositivos Xbee utilizaron el protocolo de enrutamiento AODV que facilita las comunicaciones para una red cambiante, ya que los nodos móviles tienen distintas posiciones a lo largo del tiempo y por ello se requiere el uso de nodos intermedios para comunicarse.

Las variables a medir en un invernadero usualmente son aquellas que están relacionadas con el desarrollo adecuado de los cultivos. Si se mantiene un ambiente controlado por medio de tecnologías de control y comunicación se puede obtener cultivos de calidad sin importar las condiciones ambientales externas a lo largo del año. Se optó por medir variables ambientales de temperatura, humedad, CO₂ e iluminación debido a que estas variables se relacionan fuertemente con el desarrollo de cultivos de calidad. Las muestras se obtuvieron cada 0.1 s mientras el robot avanzaba, para observar como es el cambio ambiental en el invernadero. A diferencia de otras metodologías encontradas en la literatura, la seleccionada en este trabajo es adecuada para nodos móviles, por lo cual es factible aprovechar este movimiento para poder medir el ambiente en el invernadero.

Antes de implementar la red VANET es importante simular su comportamiento bajo las condiciones en las que opera. Las dimensiones del invernadero propuesto en las que opera la red son de $8m \times 4m$, de tal forma que la simulación en este espacio y la potencia de recepción de datos en la estación base o nodo receptor. Esto dió como resultado el movimiento esperado del robot en el invernadero y el factor RSSI esperado en la implementación real. Los resultados de la simulación se mantuvieron dentro de los rangos de sensibilidad del receptor de $-85dBm$ permitidos por el estándar siendo el máximo medido de $-76dBm$.

El diseño del control y la medición del RSSI son fundamentales para definir la operación de la red VANET. Para establecer el diseño se recurrió primero al análisis de error de Lyapunov, para obtener el valor de K necesario para garantizar estabilidad en el movimiento del robot móvil. Después se trabajo con el control de la posición, y en principio los resultados no fueron lo suficientemente buenos; por lo que se estableció que el control debía cumplir con lo señalado en la ecuación 41 para un control de velocidad constante. La selección adecuada del parámetro k permitió el movimiento del robot y la simulación de las comunicaciones para completar este objetivo. Debe tenerse en cuenta que el valor de K debe mantenerse en un rango determinado para cumplir con la estabilidad.

Finalmente, se implementó la red VANET y se comparó con lo obtenido en las simulaciones. Se percibió que hubo variaciones con respecto a la simulación. Es usual que las simulaciones arrojen resultados ideales y al momento de compararlos con los valores reales existan ciertas diferencias. El control del movimiento del robot se mantuvo constante en ambos experimentos establecidos y las interferencias en el camino que hacían que el robot se desviara eran corregidas adecuadamente por el control. En el primer escenario de medición de RSSI el nodo receptor estaba a nivel del suelo. Debido a que el cuerpo del nodo móvil era un obstáculo para la propagación de la señal hasta el nodo receptor los resultados fueron muy dispares a lo simulado, sin embargo no hubo pérdida de paquetes, ya que la sensibilidad del nodo xbee es de $-100 dBm$ a pesar de que lo especificado por la norma es de $-89dBm$. Después se estableció un segundo escenario en

donde se colocó la antena receptora con una altura mayor para que tuviera una línea de mira más directa con los nodos móviles dando resultados favorables, incluso mejores que la simulación para el RSSI medido para el nodo 2. Cabe resaltar que en el segundo experimento hubo caídas en el RSSI debido a la interferencia y características aunque estas nunca estuvieron por debajo de lo permitido en el estándar IEEE 802.15.4

Referencias

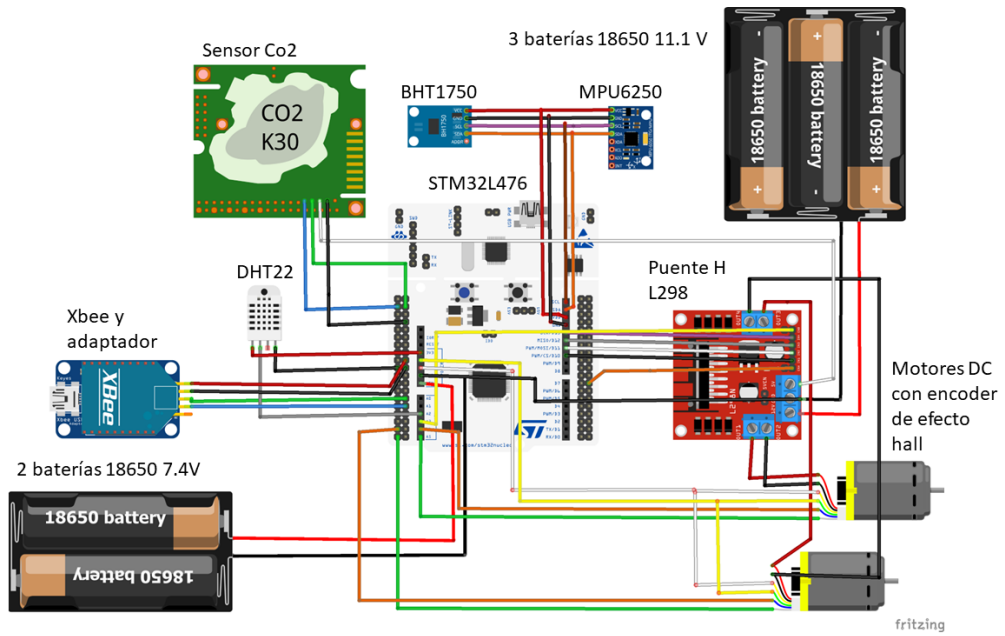
- [1] A. Kochhar y N. Kumar, “Wireless sensor networks for greenhouses: An end-to-end review”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 163, pág. 104877, 2019.
- [2] I. Amundson y X. D. Koutsoukos, “A survey on localization for mobile wireless sensor networks”, en *International workshop on mobile entity localization and tracking in GPS-less environments*, Springer, 2009, págs. 235-254.
- [3] H. Badis y A. Rachedi, “Modeling tools to evaluate the performance of wireless multi-hop networks”, en *Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems*, Elsevier, 2015, págs. 653-682.
- [4] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas y G. Koulouras, “Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey”, *Applied System Innovation*, vol. 3, n.º 1, pág. 24, 2020.
- [5] INEGI. “Encuesta Nacional Agropecuaria”. (), dirección: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2017/doc/ena2017_pres.pdf. (Consultado: 11.02.2022).
- [6] J. O. L.Pratt. “Protected Agriculture in Mexico”. (), dirección: https://publications.iadb.org/publications/english/document/Protected_Agriculture_in_Mexico_Building_the_Methodology_for_the_First_Certified_Agricultural_Green_Bond.pdf. (Consultado: 11.02.2022).
- [7] B. Mundial. “Agricultura, valor agregado (% del PIB) - Mexico”. (), dirección: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=MX>. (Consultado: 11.02.2022).
- [8] Y. Villarpriego, “Ficha sector. Invernaderos y sistemas de riego en México 2020”, págs. 1-11, 2020. dirección: <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2020858538.html?idPais=MX>.
- [9] Hortalizas. “Panorama mexicano: revisión de datos de la industria de invernadero en México”. (), dirección: <https://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/panorama-mexicano-revision-de-datos-de-la-industria-de-invernadero-en-mexico/>. (Consultado: 8.03.2022).
- [10] U. Nations. “World Population Prospects 2019”. (), dirección: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf. (Consultado: 14.02.2022).
- [11] M. Mancuso y F. Bustaffa, “A wireless sensors network for monitoring environmental variables in a tomato greenhouse”, en *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, vol. 10, 2006.
- [12] T. Ahonen, R. Virrankoski y M. Elmusrati, “Greenhouse Monitoring with Wireless Sensor Network”, en *2008 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, 2008, págs. 403-408. DOI: 10.1109/MESA.2008.4735744.
- [13] R. Pahuja, H. Verma y M. Uddin, “A Wireless Sensor Network for Greenhouse Climate Control”, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 12, n.º 2, págs. 49-58, 2013. DOI: 10.1109/MPRV.2013.26.
- [14] A. Pawlowski, J. L. Guzman, F. Rodríguez, M. Berenguel, J. Sánchez y S. Dormido, “Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-Based Control”, *Sensors*, vol. 9, n.º 1, págs. 232-252, 2009, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s90100232. dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/9/1/232>.

- [15] W. Qiu, L. Dong, F. Wang y H. Yan, "Design of intelligent greenhouse environment monitoring system based on ZigBee and embedded technology", en *2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics - China*, 2014, págs. 1-3. DOI: 10.1109/ICCE-China.2014.7029857.
- [16] G. S. Gupta y V. M. Quan, "Multi-sensor integrated system for wireless monitoring of greenhouse environment", en *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/SAS.2018.8336723.
- [17] U. J. L. dos Santos, G. Pessin, C. A. da Costa y R. da Rosa Righi, "AgriPrediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops", *Computers and electronics in agriculture*, vol. 161, págs. 202-213, 2019.
- [18] A. Kodole y P. Agarkar, "A survey of routing protocols in mobile ad hoc networks", *Multi-disciplinary Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 2, n.º 1, págs. 336-341, 2015.
- [19] H. Durmuş, E. O. Güneş y M. Kırcı, "Data acquisition from greenhouses by using autonomous mobile robot", en *2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 2016, págs. 1-5. DOI: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2016.7577696.
- [20] X. Geng, Q. Zhang, Q. Wei y col., "A Mobile Greenhouse Environment Monitoring System Based on the Internet of Things", *IEEE Access*, vol. 7, págs. 135 832-135 844, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2941521.
- [21] P. Mohapatra y S. Krishnamurthy, *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [22] R. Hekmat, *Ad-hoc networks: fundamental properties and network topologies*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [23] J. Yick, B. Mukherjee y D. Ghosal, "Wireless sensor network survey", *Computer networks*, vol. 52, n.º 12, págs. 2292-2330, 2008.
- [24] K. Yang, *Wireless sensor networks*. Springer, 2014.
- [25] A. Elahi y A. Gschwendner, *ZigBee wireless sensor and control network*. Pearson Education, 2009.
- [26] Digi. "DigiMesh Products". (), dirección: <https://www.digi.com/products/browse/digimesh>. (Consultado: 20.09.2022).
- [27] Q. Jiang y D. Manivannan, "Routing protocols for sensor networks", en *First IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2004. CCNC 2004.*, IEEE, 2004, págs. 93-98.
- [28] L. A. Manrique, "Greenhouse crops: A review", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 16, n.º 12, págs. 2411-2477, 1993.
- [29] P. Lorenzo, "El cultivo en invernaderos y su relación con el clima", *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*, n.º 3, págs. 23-44, 2012.
- [30] J. Badgery-Parker, "Light in the greenhouse", *NSW Agriculture*, 1999.
- [31] G. Dudek y M. Jenkin, *Computational principles of mobile robotics*. Cambridge university press, 2010.
- [32] S. K. Malu y J. Majumdar, "Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot", *Global Journal of Research In Engineering*, 2014.

- [33] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, ép. Pearson Education. Prentice Hall, 2002. dirección: https://books.google.com.mx/books?id=t%5C_d1QgAACAAJ.
- [34] E.-E.-L. Lau y W.-Y. Chung, “Enhanced RSSI-Based Real-Time User Location Tracking System for Indoor and Outdoor Environments”, en *2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, 2007, págs. 1213-1218. DOI: 10.1109/ICCIT.2007.253.
- [35] S. Farahani, *ZigBee wireless networks and transceivers*. newnes, 2011.
- [36] ST. “STM32 32-bit Arm Cortex MCUs”. (), dirección: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>. (Consultado: 20.09.2022).
- [37] E. Pruna, E. R. Sasig y S. Mullo, “PI and PID controller tuning tool based on the lambda method”, en *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CHILECON.2017.8229616.

Apéndice

Diagrama de conexión de la plataforma móvil



Esquemático de conexión de componentes del robot móvil

Tarjeta STM32L476 (Pinout)

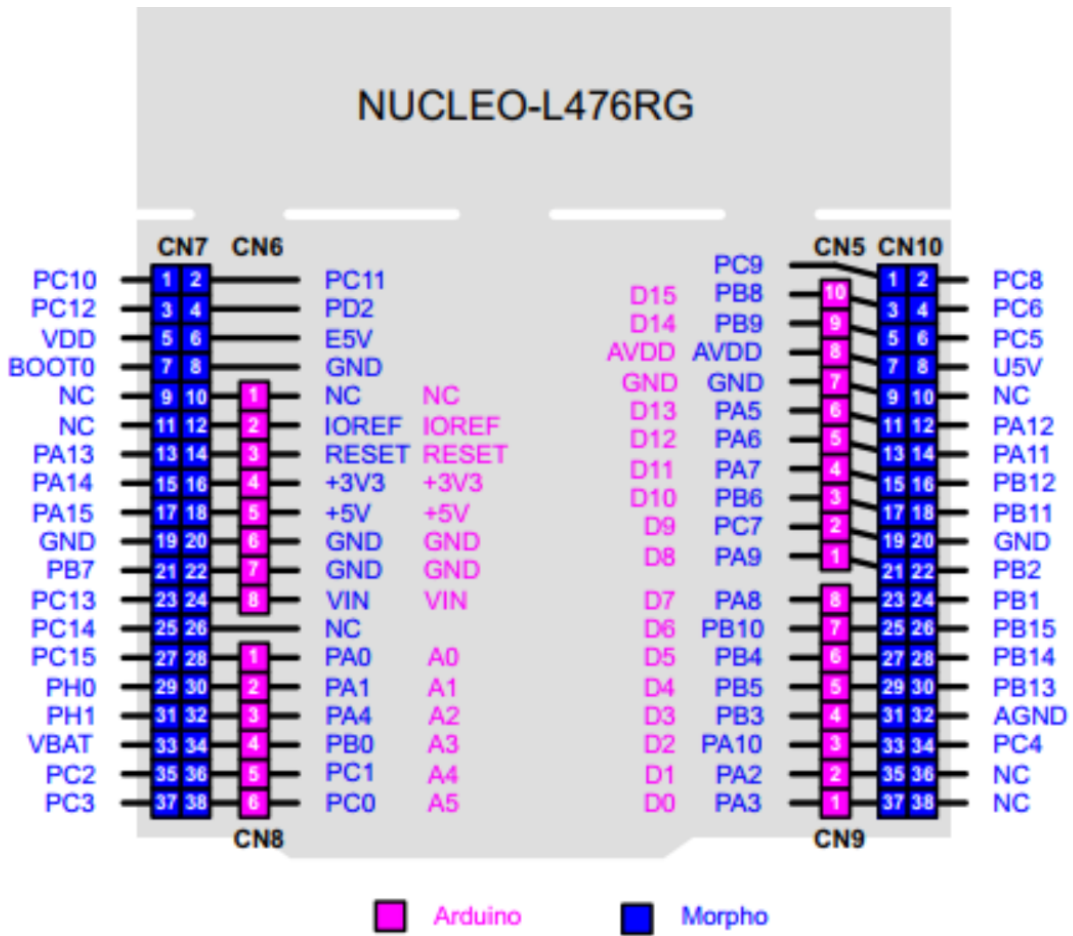


Diagrama de pines de STM32L476

Anexos

Publicaciones

Con los resultados obtenidos a lo largo de la elaboración del presente trabajo de tesis se derivaron dos publicaciones:

- **Artículo 1:** E.C. Garcia et al "Simulation of a VANET Network for Monitoring a Greenhouse with Two Mobile Nodes." en *Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Monterrey 2023* con ISSN 1946-5351, Vol 15, No. 2, 2023
- **Artículo 2:** E.C. Garcia et al, "Diseño de una Simulación para el Análisis de RSSI de una Red Vanet para el Monitoreo de un Invernadero con Dos Nodos Móviles y Diseño de Control de un Robot Móvil Diferencial" *Abstraction and Application*, vol. 43, pp.85-94, 2023

Simulation of a VANET Network for Monitoring a Greenhouse with Two Mobile Nodes

Elias Christopher Garcia Herrera¹, Dra. Josefina Castañeda Camacho²,
Dr. José Eligió Moisés Gutiérrez Arias³, Dra. Gabriela Pérez Osorio⁴, Dr. Edgar Peralta Sánchez⁵ y M.C. Ana María Rodríguez Domínguez⁶

Abstract— The knowledge about the greenhouse environment is very important to control physical variables as temperature, humidity, CO₂ concentration and luminosity. VANET (Vehicular Ad-hoc Network) is a particular case of multi - hop wireless network, which has the restriction of rapid topology changes due to the high mobility of nodes. With the growing number of vehicles equipped with computer technologies and wireless communication devices, vehicle communication is becoming a promising field of research, standardization, and development, in future VANET will be part of smart cities and different application as greenhouses. In this paper the results of power data transmission simulation in a greenhouse are presented. This work is divided in two parts the communication and control of the mobile nodes. Communication implies the wireless strategy by which the nodes transfer the information, and the control part is the way they move around greenhouse.

Keywords—Mobile nodes, greenhouse, monitoring, control.

Introduction

The increment of the global population will have an important repercussion in the food supply around the world. In addition, the World Population Prospect is an official estimation and projection of the future elaborated by the Department of Economic and Social Affairs (DESA) of the United Nations since 1951. In its last update in 2019 was estimated a population of 7.7 billion and it has been projected that by the year 2059 there will be an increase in the population about 9.7 billion [1]. For this reason, it is important to have a good quality of the food and wealthy crops throughout the year, no matter the change of climate in the different season. The greenhouse is a technique of protected agriculture (PA) that maintain a controlled environment in a closed place, and it is a good solution for food supply during the year. To obtain a good quality in crops it is needed to be monitoring the environment in the greenhouse with a sensors network. Thus, the objective of this work is applying VANET concept in two differential drive mobile nodes to measure different physical variables: temperature, humidity, CO₂ and luminosity in a greenhouse. The first and second sections of this paper presents the simulation of the wireless sensor network and the control strategy of the mobile nodes, respectively. Third section presents simulation results and finally conclusion and future work are included.

Wireless sensor networks in greenhouses

A Wireless sensor network (WSN) is deployed in a specific space to measure the environment and have a huge application as: military, health, tracking wildfire, agriculture, etc., [2]. The WSN consist of a set of a few or thousands of nodes (depending on the type of application) and have the necessary hardware to measure, process and transmit the information captured through sensors over a wireless network. To measure environment in greenhouse each node usually uses sensors of temperature, humidity, CO₂ and luminosity. To process information it uses a

¹ Ing. Elias Christopher García Herrera is Student of the “Maestría en Ingeniería Electrónica” at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México elias.garciaher@alumno.buap.mx (**autor corresponsal**)

² Dra. Josefina Castañeda Camacho is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México josefina.castaneda@correo.buap.mx

³ Dr. José Eligió Moisés Gutiérrez Arias is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México jose.gutierrez@correo.buap.mx

⁴ Dra. Gabriela Pérez Osorio is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México gabriela.perez@correo.buap.mx

⁵ Dr. Edgar Peralta Sánchez is Professor at “Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla”, México edgar.peralta@upaep.mx

⁶ M.C. Ana María Rodríguez Domínguez is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México anamaria.rodriguez@correo.buap.mx



08 marzo 2023

AUTORES: Ing. Elías Christopher Garcia Herrera
Dra. Josefina Castañeda Camacho
Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez Arias
Dra. Gabriela Pérez Osorio
Dr. Edgar Peralta Sánchez
M.C. Ana María Rodríguez Domínguez

ARTÍCULO: **Simulation of a VANET Network for Monitoring a Greenhouse with Two Mobile Nodes**

ARTÍCULO Núm: MTY139

Estimados autores,

Con agrado les informamos que, con fecha de hoy, el artículo arriba citado ha sido aprobado para su presentación en el *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Monterrey 2023*. El congreso tendrá lugar presencial y virtual los días 13 y 14 de marzo de 2023 en el Colegio de Educación Profesional Técnica de Nuevo León (CONALEP NL), y en el portal www.academiajournals.com.

El artículo será incluido en las publicaciones del congreso, que incluyen modalidades ISBN, ISSN, e indexación en *Fuente Académica Plus* de EBSCOHost.

1. Volúmenes online con *ISSN 1946-5351, Vol. 15, No. 02, online*, e indexación en Fuente Académica Plus de EBSCOhost en Estados Unidos.
2. Libro digital ebook con *ISBN online*.

Saludos cordiales.

Dr. Rafael Moras, P.E.
Editor
Academia Journals
contacto@academiajournals.com

Diseño De Una Simulación Para El Análisis Del RSSI De Una Red VANET Para El Monitoreo De Un Invernadero Con Dos Nodos Móviles y Diseño De Control De Un Robot Móvil Diferencial

Design of a simulation for the analysis of the RSSI of a VANET network for the monitoring of a greenhouse with two mobile nodes and control design of a differential mobile robot

Abstract

Monitoring the greenhouse environment is important to control physical variables such as temperature, humidity, CO₂ concentration and luminosity. VANET (Vehicular Ad-hoc Network) is a particular case of multi-hop wireless network that has the restriction of rapid topology changes due to the high mobility of nodes. With the growing number of vehicles equipped with computer technologies and wireless communication devices, vehicle communication is becoming a promising field of research, standardization, and development; In the future, VANET will be part of smart cities and will have different applications. This article presents the results of the simulation of a VANET network of two nodes in a greenhouse as well as the design and analysis by Lyapunov of the control of the mobile nodes of that network.

Resumen

El monitoreo del ambiente del invernadero es muy importante para controlar variables físicas como temperatura, humedad, concentración de CO₂ y luminosidad. VANET (Vehicular Ad-hoc Network) es un caso particular de red inalámbrica multisalto que tiene la restricción de cambios rápidos de topología debido a la alta movilidad de los nodos. Con el creciente número de vehículos equipados con tecnologías informáticas y dispositivos de comunicación inalámbrica, la comunicación de vehículos se está convirtiendo en un campo prometedor de investigación, estandarización y desarrollo; en el futuro, VANET será parte de las ciudades inteligentes y tendrá diferentes aplicaciones. En este artículo se presentan los resultados de la simulación de una red VANET de dos nodos en un invernadero así como el diseño y análisis por Lyapunov del control de los nodos móviles de dicha red.

Keywords and phrases: Red Vanet, Nodo Móvil, Análisis de Lyapunov, Robot Diferencial, Red de sensores inalámbrica.

2020 Mathematics Subject Classification: 68N01

1 Introducción

El incremento de la población mundial tendrá una importante repercusión en el suministro de alimentos, la Perspectiva de la población mundial (World Population Prospect) es una estimación y



BUAP

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

A través de la Facultad de Ciencias de la Computación
otorga la presente

CONSTANCIA

**A: Elias Christopher Garcia Herrera, Josefina
Castañeda Camacho, José Eligió Moisés Gutiérrez
Arias, Nicolás Quiroz Hernández**

Por haber impartido la ponencia simultanea "Diseño de una Simulación para el Análisis del RSSI de una Red VANET para el Monitoreo de un Invernadero con Dos Nodos Móviles y Diseño de Control de un Robot Móvil Diferencial", en el marco del XIII Congreso Nacional de Ciencias de la Computación CONACIC 2023, de la Facultad de Ciencias de la Computación del 02 al 06 de octubre de 2023.

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Z., a 06 de octubre de 2023

M.I. María del Consuelo Molina García
Directora