

Robots Autónomos en Trabajo Colaborativo Utilizados en la Agricultura Protegida

Alejandro Medina Santiago¹, Eva Valdez Alemán²,
Adrián Osnaya Lara³.



Acerca de los autores...

¹ Investigador titular de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

² Docente adscrito a la División de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

³ Egresado de la carrera de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Resumen

El artículo presenta el diseño, construcción, programación de un prototipo de robot móvil autónomo basado en Redes Neurales Artificiales, implementando un sistema de monitoreo y control inalámbrico, con la capacidad para detectar gases de efecto invernadero y variables físicas dentro

de la agricultura protegida (AP), que logre alcanzar un libre desplazamiento entre los surcos de la huerta o campo prueba, mediante un algoritmo de evasión de obstáculos y visualizando la información desde una plataforma de interfaz visual y posicionamiento global vía GPS, con la finalidad de crear un sistema robótico arquetipo funcional, que sirva de base para una nueva propuesta tecnológica en la AP.

Palabras Clave: agricultura protegida, robot colaborativo, comunicación inalámbrica, redes neuronales.

Introducción

Actualmente, en el campo de la robótica se está dando un gran desarrollo en el ámbito de los robots cooperativos, donde la robótica colectiva busca diseñar sistemas compuestos de varios robots capaces de resolver problemas conjuntamente, con el fin de agilizar la producción en diversas áreas industriales como en la agricultura protegida, entre otras tantas aplicaciones de la denominada robótica en colmena [8].

La agricultura protegida en México contempla en sus instalaciones el uso de tecnología para el monitoreo del clima, o riegos computarizados y de precisión. Los invernaderos modernos son acondicionados con mecanismos y equipos necesarios con el propósito de controlar temperatura, luminosidad, humedad ambiental y del sustrato, ventilación, aporte de CO² y fertilización [9-10]

Para la implementación de robots en la agricultura, la **Universidad de Wageningen [1]**, desarrolló un tractor que funciona de manera autónoma en la producción de cultivos hortícolas en extensivo, y ha estado desarrollando un robot integral con una plataforma de soporte altamente configurable, modular e inteligente (con sensores, cámaras, pulverizadores, pinzas, etcétera) con gran capacidad para adaptarse a las tareas y condiciones dentro del cultivo. Por otra parte, se han desarrollado recolectores de naranjas y manzanas, por la empresa Vision Robotic Corporation [2], de San Diego. Por medio de un sistema escáner colocado en varios brazos multi-ejes y usando varias cámaras estereoscópicas.

En el laboratorio de Bio-robótica de la Universidad Tecnológica de Delft [3], se desarrollan máquinas que caminan a pie, con la mayor apariencia humana. En el sector agrícola podrían emplearse para actividades que necesiten desplazamiento, como la aplicación de productos fitosanitarios y el monitoreo de los cultivos en extensivo o en invernaderos.

El **FitoRobot [13]**, es un robot pulverizador autopropulsado capaz de desplazarse de forma autónoma por las líneas de cultivo, provisto de un sistema de navegación, sensores y un sistema de control de la pulverización que relaciona la presión del tratamiento con la velocidad de desplazamiento del equipo.

El **Case IH[15]** usa una combinación de sistemas de posicionamiento global y tecnología celular para enviar y recibir información agronómica y del lugar de trabajo. Los sistemas telemáticos pueden ayudarle a mejorar su productividad con una gestión minuto a minuto de los recursos y labores.

Mediante la agricultura protegida, se le proporciona al cultivo los requerimientos óptimos de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, ventilación, luz, radiación solar, bióxido de carbono, oxígeno y fertirriego, para que el déficit

de presión de vapor sea el correcto y así poder obtener el mayor rendimiento y calidad óptima de los cultivos. Actualmente, el sector agroalimentario es objeto de especial atención en cuanto a la incorporación de tecnologías avanzadas, dadas las exigencias cada vez mayores de producción, diversidad y calidad de los productos, así como de la presentación de los mismos. Todo ello con el problema creciente de la falta de mano de obra y los riesgos de salud a que son expuestos los agricultores [11-12]

Modelo Experimental

La Figura 1 muestra el diagrama a bloques con la secuencia de procedimientos para el desarrollo de robots con funciones autónomas y colaborativas.

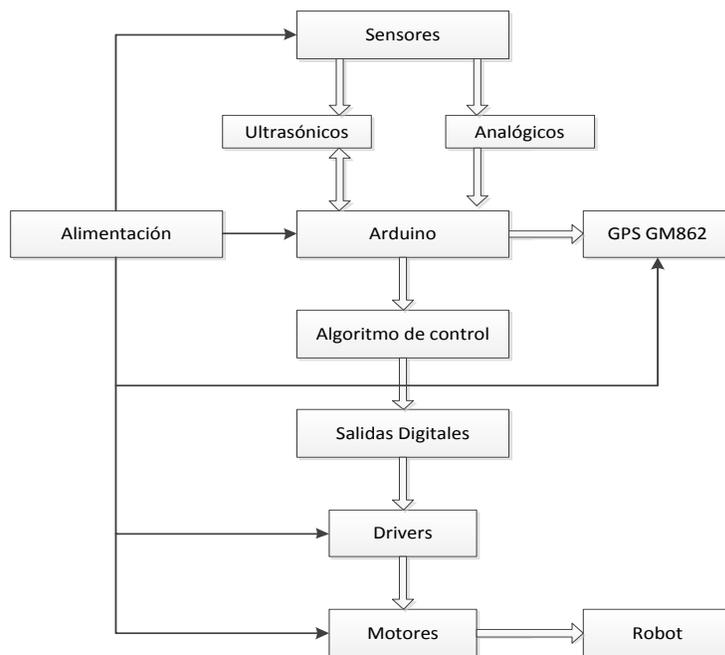


Figura 1

Diagrama a bloques del modelo experimental.

Antes de comenzar las tareas de programación, se hizo un análisis del algoritmo para elegir el tipo de red que se utilizaría en el robot, con el fin de resolver la toma de decisiones, dado que se emplearon redes neuronales artificiales y que existen muchos tipos de redes que se pueden implementar. Para ello, fue importante considerar lo siguiente:

- La red debe recibir todos los datos de entrada, y usar todos de forma “paralela” dentro del algoritmo; por tanto, la capa de entrada deberá constar de siete entradas, ya que se usarán tres sensores ultrasónicos y cuatro analógicos.
- Al utilizar dos puentes H para controlar las cuatro llantas del motor, será necesario que la red disponga de una capa de salida constituida por cuatro neuronas, para controlar cada par de llantas.
- Debido a lo mencionado anteriormente, podemos observar que será necesario crear una red multicapa, ya que con una red monocapa no sería posible resolver esta problemática, debido a la cantidad de entradas y salidas de la red.

Considerando estas necesidades, se creó una red Perceptrón multicapa, de tres entradas y tres salidas, para primero crear un algoritmo que solo trabaje con los sensores ultrasónicos. Una vez hecho esto, se procedió a trabajar con una red Perceptrón multicapa de cuatro entradas y cuatro salidas, que corresponden a la lectura de los sensores analógicos; esto solamente como prueba, para observar cómo responde el sistema.

En el caso de una red de cuatro entradas, aumenta el número de combinaciones, debido a que estamos hablando de la lectura de los cuatro sensores analógicos del sistema, por lo cual el número de neuronas será mayor. Dado que se tienen cuatro vectores que contienen los datos de cada entrada, fue necesario crear una matriz de cuatro filas, donde se encontraran todas las combinaciones posibles para este problema.

Para este propósito se crean los vectores nombrados p1, p2, p3 y p4, los cuales posteriormente, deben ser guardados en una matriz llamada "p", que será la que se ingrese a la red. Asimismo, se debe crear una matriz de salidas deseadas, de la misma forma que se hizo con la matriz de entradas.

Al tener estos datos listos, se implementa la red tomando los valores de p y t, usando el comando *newff* y debido a la complejidad del problema, es necesario crear una red más compleja, por lo cual ésta cuenta con una capa de entrada de cuatro neuronas, una primera capa oculta de 15 neuronas, una segunda capa oculta de nueve neuronas, y una capa de salida de cuatro neuronas. Las funciones de transferencia correspondientes deben ser *tansig*, *tansig*, *tansig* y *purelin*. El método de entrenamiento más efectivo para este caso, es el *traincgp*, al igual que en la red de tres entradas. El comando final para crear la red es el siguiente:

```
>>net=newff(minmax(p),[4 15 9 4],{'tansig','tansig','tansig','purelin'},'traincgp');
```

Una vez listas las dos simulaciones, se procedió a trabajar con la red final de siete entradas y cuatro salidas. La finalidad de esta actividad fue comprender cómo la red neuronal resuelve la problemática que se le está presentando, y como separa los patrones de otros para ello.

Posteriormente, se procedió a simular una red de tipo Backpropagation de siete entradas y cuatro salidas, definiendo cuántas capas ocultas tendrá después de haber hecho la simulación de las anteriores. Esta red nos dará mejores resultados, ya que los cálculos se hacen en las capas ocultas, y la conectividad de la red es mayor que la de una red monocapa.

Una vez creada la red neuronal, hay que inicializar los pesos, y configurar el entrenamiento que se debe llevar a la red para poder conseguir los pesos sinápticos y bias adecuados para resolver el problema planteado. Los comandos siguientes son los encargados de dicha tarea:

```
>>net=init(net);  
>>net.trainparam.epochs=1000;  
>>net.trainparam.goal=1e-3;  
>>net=train(net,p,t);
```

Una vez que se llevó a cabo dicho entrenamiento, se obtuvieron las gráficas siguientes, que muestran cómo la red obtuvo los pesos y bias adecuados hasta la iteración número 562, y se observa en la Figura 2 la separabilidad del sistema, de manera que ya disponemos de una red que podrá resolver el problema planteado.

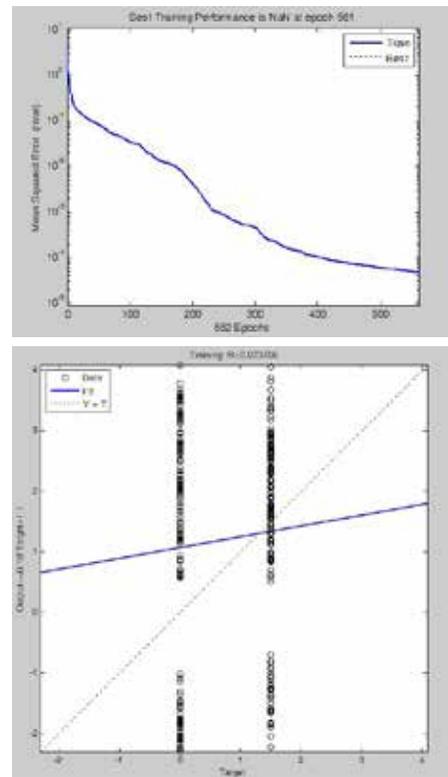
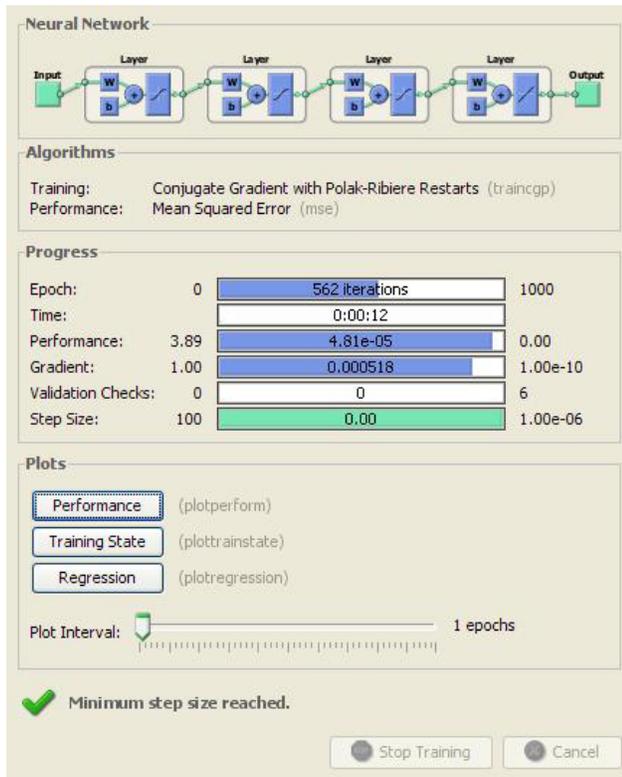


Figura 2

Entrenamiento de la red y separabilidad del sistema

Luego de obtener las salidas deseadas, podemos extraer los datos de las bias y pesos sinápticos de la red, de la capa de entrada, capas ocultas, y la capa de salida, con los comandos siguientes, los cuales nos entregarán los datos que llevaremos a nuestro código en el Arduino.

```
>>net.b{1,1},net.b{2,1},net.b{3,1},net.b{4,1}
>>net.iw{1,1},net.lw{2,1},net.lw{3,2},net.lw{4,3}
```

Después de simular las redes neuronales de distintas entradas, y con distintas arquitecturas, es necesario llevar la red al Arduino para poder hacer pruebas físicas, por lo cual es necesario crear un “sketch” con el software Arduino, del cual se dispone la versión 1.0.1, y de un Arduino Duemilanove. Teniendo en cuenta que estamos haciendo uso de sensores analógicos, comunicación serial de tipo I2C, comunicación inalámbrica por el puerto serial, y salidas digitales, es necesario configurar el Arduino, incluir las librerías necesarias, y crear las variables a utilizarse en el programa final.

Para ello, primero se hicieron pruebas a cada uno de los dispositivos y con base a ello, se ensambló todo el proyecto, para tener un programa final que incluyera la implementación de todos los sensores y dispositivos previamente mencionados.

En el caso de la red Backpropagation de tres entradas, se consideraron los datos que entregó el Matlab, y se realizó la red, creando variables para las neuronas de la misma, las salidas, las lecturas de los sensores ultrasónicos y las entradas de la red neuronal. Asimismo, fue necesario incluir la librería Math.h y Wire.h, debido que dentro de la red es preciso hacer uso de las funciones de transferencia, y de la comunicación I2C, respectivamente.

En el caso de los sensores analógicos, el código cambia en la parte de la cabecera y la configuración, pues no se hará uso de la comunicación serial de tipo I2C, sino solamente de la librería Math.h.

La red neuronal es mucho más compleja que la anterior red neuronal implementada en los sensores ultrasónicos, debido a que se le presentó un problema mucho más complejo, pues los sensores ultrasónicos tienen lecturas entre 20 y 600, valores que no rebasan los mil datos, mientras que los sensores analógicos, entregan valores de 20 a 2,000 partes por millón, en el caso del MQ-7; mientras que para el MQ-4 son valores entre 300 y 10,000 partes por millón, de ahí la complejidad de la red neuronal.

Las variables de relevancia para conocer el estado de un cultivo, la calidad con la que cuenta y los gases percibidos en el ambiente dentro de la agricultura, conducen al monitoreo de la información con sensores de gas óptimos y de precisión. La experimentación y pruebas de los sensores se efectuó por medio de programación en lenguaje C++, con software Processing, para obtener los datos necesarios y realizar la caracterización de las variables a monitorear [14].

El robot móvil ejerce cuatro movimientos básicos: enfrente, atrás, izquierda y derecha; por lo que en primera instancia se efectuaron rutinas de planeo previamente establecidas. a fin de comprobar su correcto funcionamiento durante los recorridos en el terreno agrícola, a través de georreferencia de cultivo.

El tipo de movimiento que efectúa el robot, es de tracción diferencial [16-21] para un eficaz recorrido a través de los surcos del terreno agrícola; la configuración permite al robot girar sobre su propio eje, y moverse en espacios congestionados. Las configuraciones para el desplazamiento del robot son: hacia adelante y reversa, girar a la izquierda y girar a la derecha. Como se muestra en la figura 3.

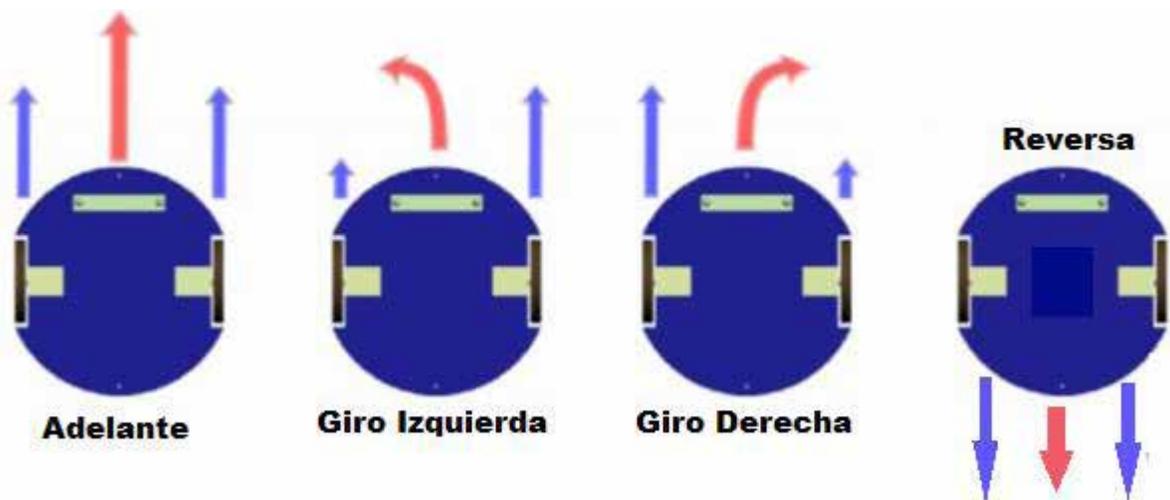


Figura 3

Movimiento del robot.

El campo de prueba [22-24, 28-31] para la aplicación tecnológica móvil, se muestra en la Figura 4, considerando las dimensiones reales de un invernadero con sembradío de jitomate, con la finalidad de establecer una ruta de inicio y

fin para el recorrido del robot móvil, evadiendo los obstáculos que encuentre en el camino, determinando el estado del cultivo y almacenando la información proveniente del GPS para conocer la zona exacta donde se encuentra el cultivo en mal estado o el área perjudicada.

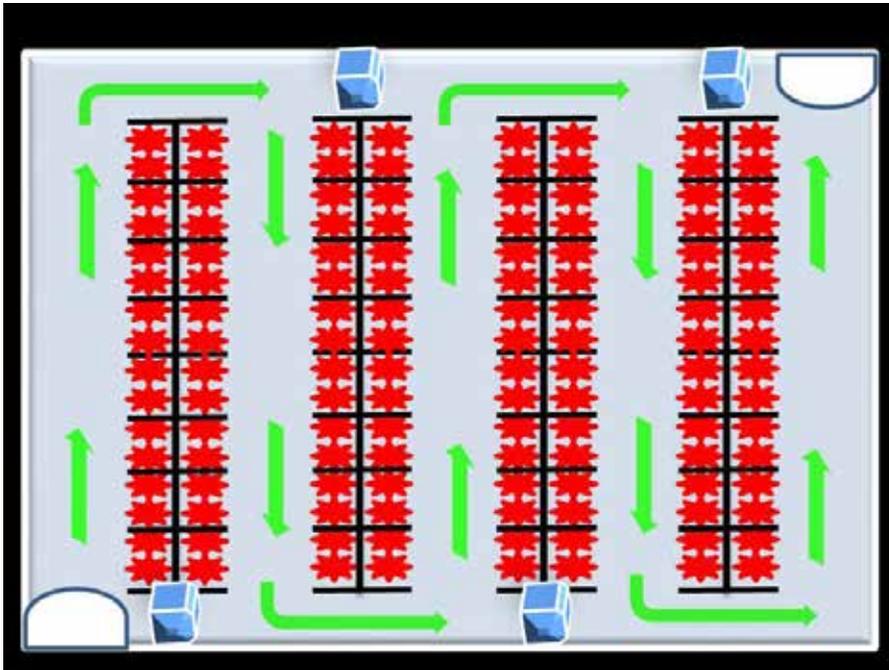


Figura 4

Recorrido del robot móvil en el terreno agrícola

Resultados

En esta sección se presenta la construcción de los robots móviles, la caracterización de los sensores, la comunicación inalámbrica e indicadora de posicionamiento global y los resultados obtenidos en el campo de prueba.

El robot fue programado con un sistema de control de lazo abierto, el cual consiste en seguir rutinas previamente programadas para comprobar el funcionamiento de los motores en conjunto con los drivers TB6612FNG ideales para el control de las llantas a utilizar dentro del chasis. El diseño se muestra en la Figura 5.

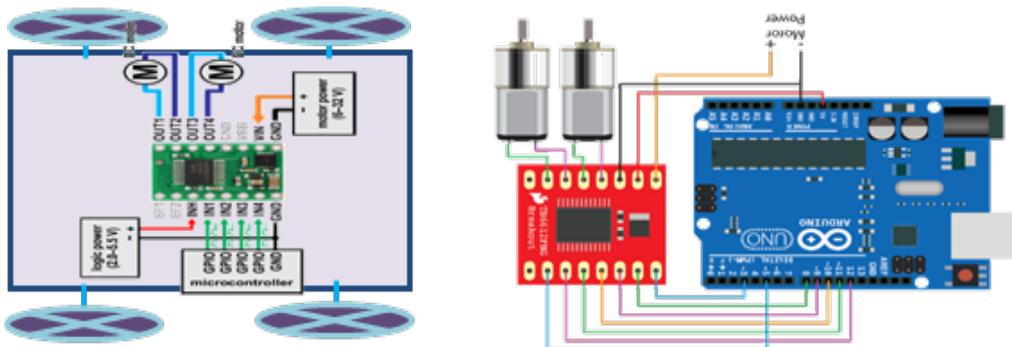


Figura 5

Chasis del robot y conexiones de dirves para motores.

Fuente: Diseñado por el estudiante.

Los drives para el funcionamiento de los motores es de acuerdo con sus parámetros de voltaje y corriente, en un chasis previamente diseñado con las características necesarias para la realización del proyecto, como se muestra en la Figura 6.

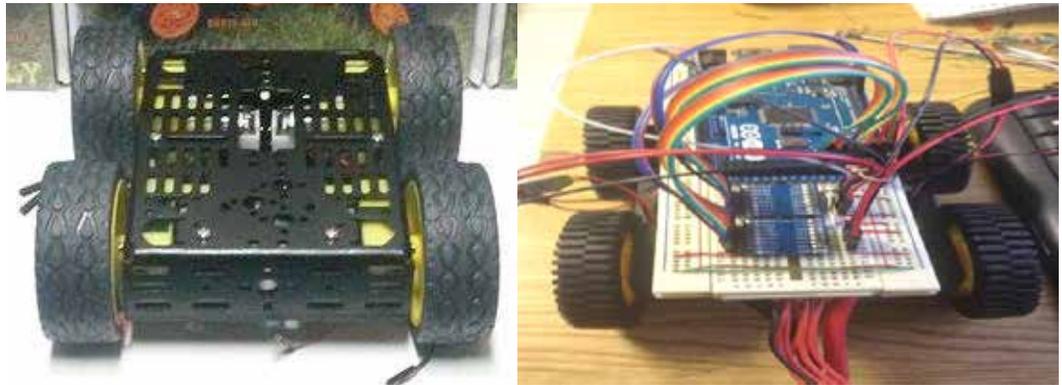


Figura 6

Fotografía de los drives y el chasis del motor.

Fuente: Fotografía tomada por el estudiante.

Caracterización de los sensores utilizados

Para la obtención de las mediciones de los sensores de efecto invernadero, se recurrió a la caracterización y visualización en el base Processing y Sistemas Embebidos Arduino Mega ADK [4, 5]; como se muestra en la Figura 7. Las características del hardware son indispensables y apropiadas para trabajar en el firmware de cada uno de los sensores y hacer las pruebas pertinentes, con el fin de encapsular todo el sistema en un solo robot principal.

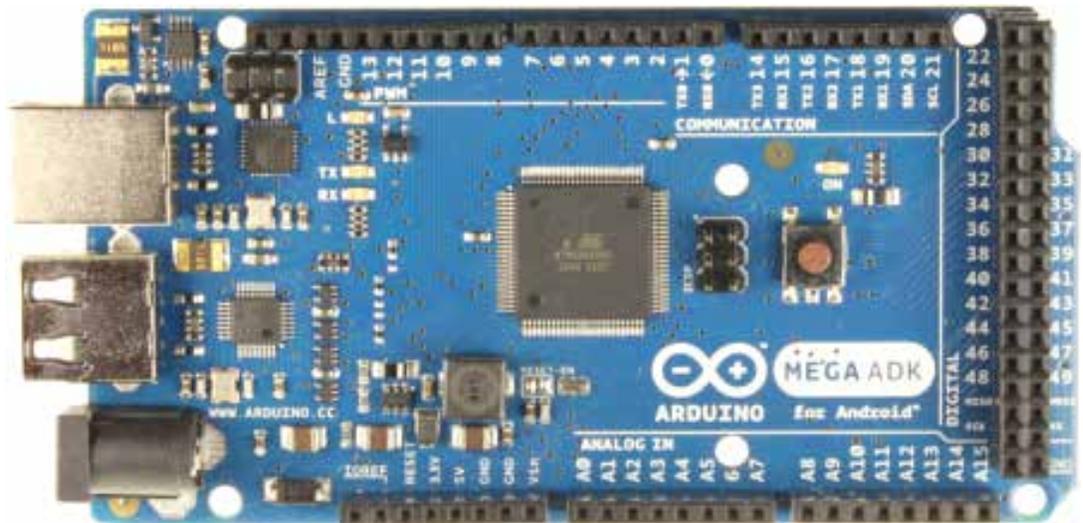


Figura 7

Arduino Mega ADK.

La mediciones se efectuaron con cuatro tipos de sensores para la detección de distintos gases emitidos dentro de terrenos agrícolas o invernadero: Sensor MQ7 (Monóxido de Carbono), MQ6 (Gas LP), MQ4 (Gas Natural), y MQ3 (Alcohol), todo ello para poder monitorear en tiempo real si algún cultivo

se encuentra en mal estado, si no ha crecido debidamente o si su tiempo de madurez rebasó el tiempo estimado de crecimiento. Por tanto, fue necesario llevar a cabo un estudio previo de cada cultivo donde se implantarían los robots colaborativos.

Para caracterizar cada uno de los sensores MQ, se sometieron a diferentes concentraciones expresadas en partículas por millón (ppm) de gas LP, Metano, Monóxido de Carbono y Etanol, dentro de un reactor diseñado especialmente para retener sustancias y poder leer cada sensor, como se muestra en las Figuras 8 y 9 del modelo experimental desarrollado en laboratorio para la mediciones.



Figura 8

Mini Reactor para pruebas con sensores de gas.

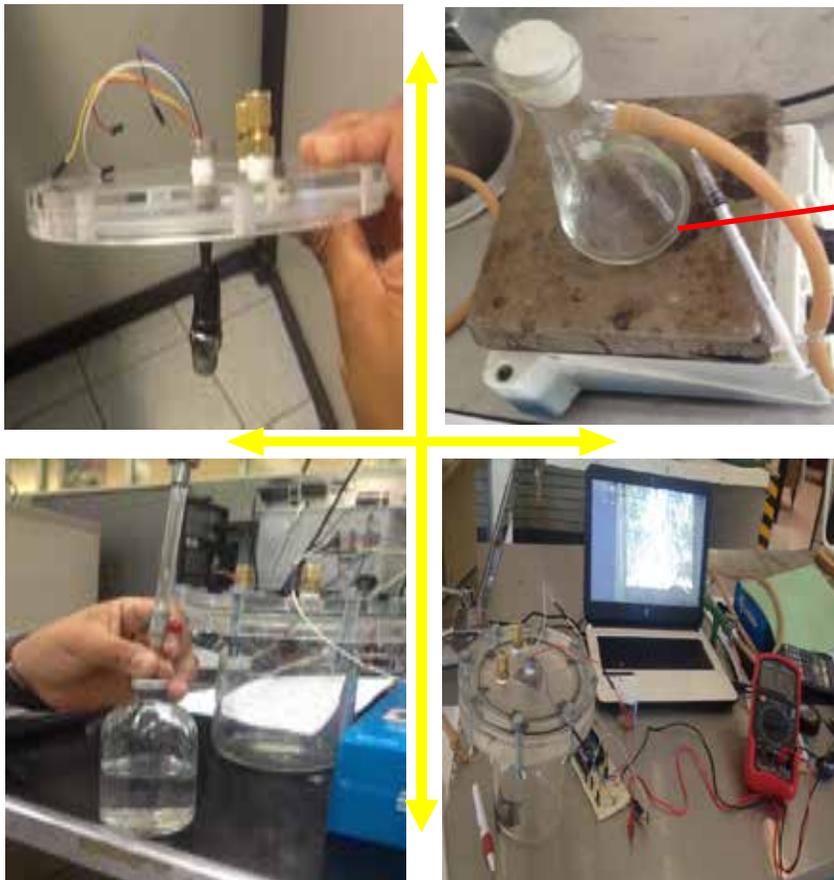


Figura 8

Procedimiento para la caracterización de sensores en el modelo experimental.

Con el programa para la obtención de la mediciones de los sensores, es posible obtener la relación de datos medidos en partes por millón (PPM) en relación con su resistencia, como se muestra en la Tabla 1.

PPM	Rs/Ro
200	1.4
300	1.24
400	1.15
500	1.1
600	1.06
700	1.04
800	1.02
900	1.009
1000	1
1100	0.99
1200	0.981
1300	0.975
1400	0.969
1500	0.966
1600	0.961
1700	0.958
1800	0.955
1900	0.952
2000	0.946
3000	0.927

Tabla 1

Mediciones de laboratorio del sensor MQ6.

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos gráficamente con respecto a la Tabla 1, para el sensor MQ6 referente al Gas LP, como respuesta a la caracterización del sensor en laboratorio, la cual se puede contrastar con la Figura 11, que corresponde a la hoja gráfica de especificaciones del fabricante. Mediante dicha comparación se logra validar la caracterización de cada uno de los sensores utilizados.



Figura 10

Gráfica obtenida para el sensor MQ6 correspondiente al GLP

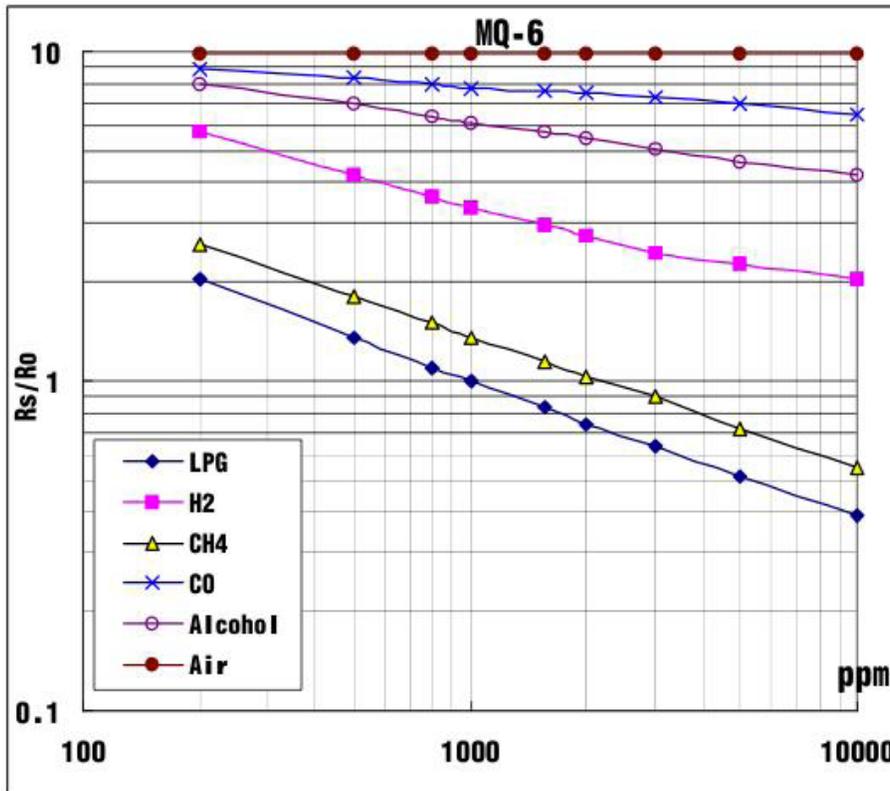


Figura 11

Hoja de especificaciones del fabricante.

Para la caracterización de los sensores de proximidad que trabajan en función con los motores de cada chasis de los robots, el objetivo principal fue la toma de decisión para avanzar, parar, retroceder y girar en ambos sentidos de las manecillas del reloj, a fin de evadir los obstáculos que se presentaran y así proseguir el curso de la ruta especificada. Su funcionamiento consta de dos partes: la emisora, que envía ráfagas de ondas ultrasónicas, y la del receptor, que percibe el rebote de estas ondas y la manda a una salida digital por medio de pulsos; la conexión realizada se muestra en la Figura 12.

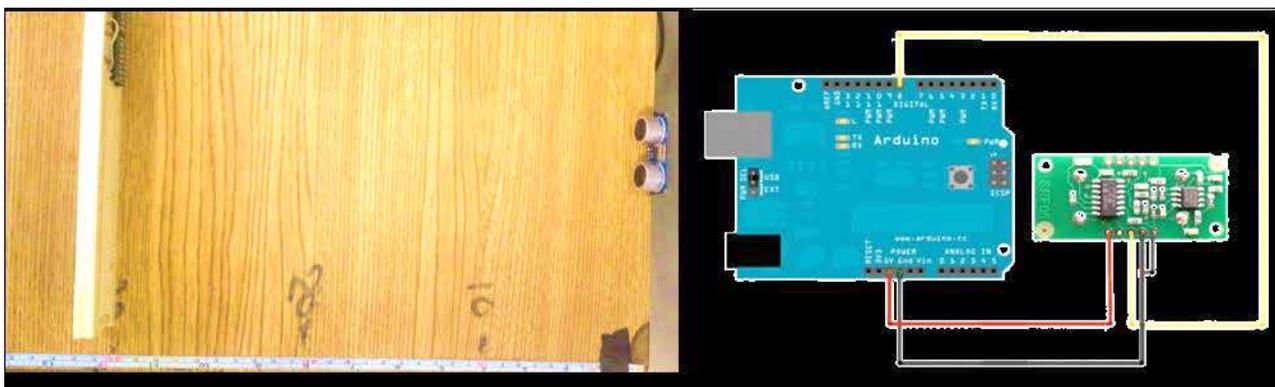


Figura 12

Conexión de ultrasónico con Arduino y pruebas del sensor en el modelo experimental.

```

COM4 (Arduino Mega ADK)

Medidor de Distancia SRF05

Distancia = 4.65 cm
Distancia = 0.05 metros

Distancia = 4.56 cm
Distancia = 0.05 metros

Distancia = 4.70 cm
Distancia = 0.05 metros

Distancia = 4.65 cm
Distancia = 0.05 metros

Distancia = 4.67 cm
Distancia = 0.05 metros

Distancia = 2.59 cm
Distancia = 0.03 metros

Distancia = 3.62 cm
Distancia = 0.04 metros

Distancia = 3.62 cm
Distancia = 0.04 metros

```

Figura 13

Monitoreo de datos en software.

Se desarrolló un programa donde el script se muestra en la Figura 13 para comprobar el funcionamiento y caracterizar los sensores.

Otros factores importantes a considerar dentro de la agricultura protegida, es el ambiente donde se encuentran los cultivos, tales como la temperatura

```

COM4 (Arduino Mega ADK)

Monitoreo de temperatura y humedad
Temperatura: 24.5400009155C / 76.2259979248F. Humedad: 47.45%
Temperatura: 24.5800018310C / 76.2619934082F. Humedad: 47.55%
Temperatura: 24.5899963378C / 76.2439956665F. Humedad: 47.88%
Temperatura: 24.5899963378C / 76.2619934082F. Humedad: 48.20%
Temperatura: 24.5999984741C / 76.2799987792F. Humedad: 48.27%
Temperatura: 24.5800018310C / 76.2439956665F. Humedad: 48.04%
Temperatura: 24.5800018310C / 76.2439956665F. Humedad: 48.01%
Temperatura: 24.5800018310C / 76.2439956665F. Humedad: 47.94%
Temperatura: 24.5599975585C / 76.2079925537F. Humedad: 47.71%
Temperatura: 24.5499954223C / 76.2079925537F. Humedad: 47.55%
Temperatura: 24.5499954223C / 76.1899948120F. Humedad: 47.45%
Temperatura: 24.5400009155C / 76.1719970703F. Humedad: 47.35%
Temperatura: 24.5400009155C / 76.1539916992F. Humedad: 47.35%
Temperatura: 24.5400009155C / 76.1719970703F. Humedad: 47.64%
Temperatura: 24.5299987792C / 76.1719970703F. Humedad: 47.74%
Temperatura: 24.5199966430C / 76.1359939575F. Humedad: 47.67%
Temperatura: 24.5100021362C / 76.0999984741F. Humedad: 47.64%
Temperatura: 24.4899978637C / 76.0999984741F. Humedad: 47.67%
Temperatura: 24.4799957275C / 76.0459976196F. Humedad: 47.60%
Temperatura: 24.4599990844C / 76.0639953613F. Humedad: 47.47%
Temperatura: 24.4399948120C / 76.0099945068F. Humedad: 47.37%
Temperatura: 24.4399948120C / 75.9739913940F. Humedad: 47.30%
Temperatura: 24.4199981689C / 75.9379959106F. Humedad: 47.27%
Temperatura: 24.4099960327C / 75.9379959106F. Humedad: 47.24%
Temperatura: 24.4099960327C / 75.9379959106F. Humedad: 47.24%
Temperatura: 24.4099960327C / 75.9559936523F. Humedad: 47.37%
Temperatura: 24.4199981689C / 75.9739913940F. Humedad: 47.47%
Temperatura: 24.4199981689C / 75.9739913940F. Humedad: 47.47%
Temperatura: 24.4300003051C / 75.9559936523F. Humedad: 47.46%
Temperatura: 24.4000015258C / 75.9559936523F. Humedad: 47.40%
Temperatura: 24.4000015258C / 75.9379959106F. Humedad: 47.40%
Temperatura: 24.4099960327C / 75.9379959106F. Humedad: 47.40%
Temperatura: 24.4000015258C / 75.9199981689F. Humedad: 47.36%
Temperatura: 24.4000015258C / 75.9199981689F. Humedad: 47.33%
Temperatura: 24.4000015258C / 75.9019927978F. Humedad: 47.30%
Temperatura: 24.3899993896C / 75.9199981689F. Humedad: 47.27%
Temperatura: 24.3799972534C / 75.9019927978F. Humedad: 47.30%
Temperatura: 24.3799972534C / 75.9019927978F. Humedad: 47.33%
Temperatura: 24.3699951171C / 75.9019927978F. Humedad: 47.36%
Temperatura: 24.3799972534C / 75.9019927978F. Humedad: 47.40%
Temperatura: 24.3799972534C / 75.9019927978F. Humedad: 47.46%

```

Figura 13

Datos obtenidos para las variables de temperatura y humedad relativa.

y la humedad; por esta razón, se implementó un sensor SHT15 con la capacidad de poder monitorear dichas variables y obtener datos relevantes para el análisis del cultivo, como se muestra en el script de la Figura 14.

Los datos obtenidos de la georeferencia podemos visualizarlos por medio de un archivo de texto generado con la información del protocolo NMEA y con el formato de datos RMC de la localización GPS del dispositivo, a una velocidad establecida de 9600 baudios, como lo muestra la Figura 16.

```

GPS_SHZ.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$GPRMC,165647.000,A,1930.6522,N,09902.3107,W,0.30,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165648.000,A,1930.6523,N,09902.3106,W,0.31,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165652.000,A,1930.6522,N,09902.3104,W,0.20,221.22,180515,,,A*78
$GPRMC,165653.000,A,1930.6523,N,09902.3104,W,0.08,221.22,180515,,,A*72
$GPRMC,165654.000,A,1930.6523,N,09902.3104,W,0.03,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165655.000,A,1930.6523,N,09902.3104,W,0.23,221.22,180515,,,A*7D
$GPRMC,165656.000,A,1930.6523,N,09902.3104,W,0.17,221.22,180515,,,A*79
$GPRMC,165657.000,A,1930.6522,N,09902.3103,W,0.23,221.22,180515,,,A*79
$GPRMC,165658.000,A,1930.6522,N,09902.3103,W,0.25,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165659.000,A,1930.6522,N,09902.3102,W,0.25,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165700.000,A,1930.6521,N,09902.3101,W,0.28,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165701.000,A,1930.6521,N,09902.3101,W,0.33,221.22,180515,,,A*7B
$GPRMC,165702.000,A,1930.6520,N,09902.3101,W,0.21,221.22,180515,,,A*7A
$GPRMC,165703.000,A,1930.6519,N,09902.3101,W,0.12,221.22,180515,,,A*71
$GPRMC,165704.000,A,1930.6519,N,09902.3101,W,0.09,221.22,180515,,,A*7C
$GPRMC,165705.000,A,1930.6519,N,09902.3101,W,0.01,221.22,180515,,,A*75
$GPRMC,165706.000,A,1930.6519,N,09902.3101,W,0.18,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165707.000,A,1930.6518,N,09902.3101,W,0.21,221.22,180515,,,A*74
$GPRMC,165708.000,A,1930.6518,N,09902.3100,W,0.09,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165709.000,A,1930.6518,N,09902.3100,W,0.06,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165710.000,A,1930.6518,N,09902.3100,W,0.05,221.22,180515,,,A*75
$GPRMC,165711.000,A,1930.6518,N,09902.3100,W,0.06,221.22,180515,,,A*77
$GPRMC,165712.000,A,1930.6517,N,09902.3099,W,0.05,221.22,180515,,,A*79
$GPRMC,165713.000,A,1930.6518,N,09902.3099,W,0.09,221.22,180515,,,A*7B
$GPRMC,165714.000,A,1930.6518,N,09902.3099,W,0.12,221.22,180515,,,A*76
$GPRMC,165715.000,A,1930.6518,N,09902.3099,W,0.15,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165716.000,A,1930.6518,N,09902.3099,W,0.20,221.22,180515,,,A*75
$GPRMC,165717.000,A,1930.6519,N,09902.3098,W,0.25,221.22,180515,,,A*71
$GPRMC,165718.000,A,1930.6519,N,09902.3098,W,0.35,221.22,180515,,,A*7F
$GPRMC,165719.000,A,1930.6520,N,09902.3097,W,0.48,221.22,180515,,,A*71
$GPRMC,165720.000,A,1930.6521,N,09902.3096,W,0.60,221.22,180515,,,A*71
$GPRMC,165721.000,A,1930.6521,N,09902.3095,W,0.47,221.22,180515,,,A*76
$GPRMC,165722.000,A,1930.6521,N,09902.3093,W,0.47,221.22,180515,,,A*73
$GPRMC,165723.000,A,1930.6521,N,09902.3092,W,0.44,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165724.000,A,1930.6521,N,09902.3091,W,0.39,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165725.000,A,1930.6521,N,09902.3090,W,0.00,221.22,180515,,,A*74
$GPRMC,165726.000,A,1930.6521,N,09902.3090,W,0.00,221.22,180515,,,A*77
$GPRMC,165727.000,A,1930.6521,N,09902.3090,W,0.27,221.22,180515,,,A*73
$GPRMC,165728.000,A,1930.6520,N,09902.3089,W,0.60,221.22,180515,,,A*76
$GPRMC,165729.000,A,1930.6520,N,09902.3087,W,0.88,221.22,180515,,,A*7F
$GPRMC,165730.000,A,1930.6520,N,09902.3085,W,0.63,221.22,180515,,,A*70
$GPRMC,165731.000,A,1930.6520,N,09902.3083,W,0.51,221.22,180515,,,A*76
$GPRMC,165732.000,A,1930.6519,N,09902.3081,W,0.42,221.22,180515,,,A*7F
$GPRMC,165733.000,A,1930.6519,N,09902.3080,W,0.56,221.22,180515,,,A*7A
$GPRMC,165734.000,A,1930.6519,N,09902.3079,W,0.33,221.22,180515,,,A*78
$GPRMC,165735.000,A,1930.6518,N,09902.3079,W,0.06,221.22,180515,,,A*7E
$GPRMC,165736.000,A,1930.6518,N,09902.3078,W,1.26,221.22,180515,,,A*7F
$GPRMC,165737.000,A,1930.6517,N,09902.3075,W,1.76,221.22,180515,,,A*79
$GPRMC,165738.000,A,1930.6516,N,09902.3070,W,1.03,221.22,180515,,,A*70

```

Figura 16

Obtención de datos en archivo de texto con información del GPS

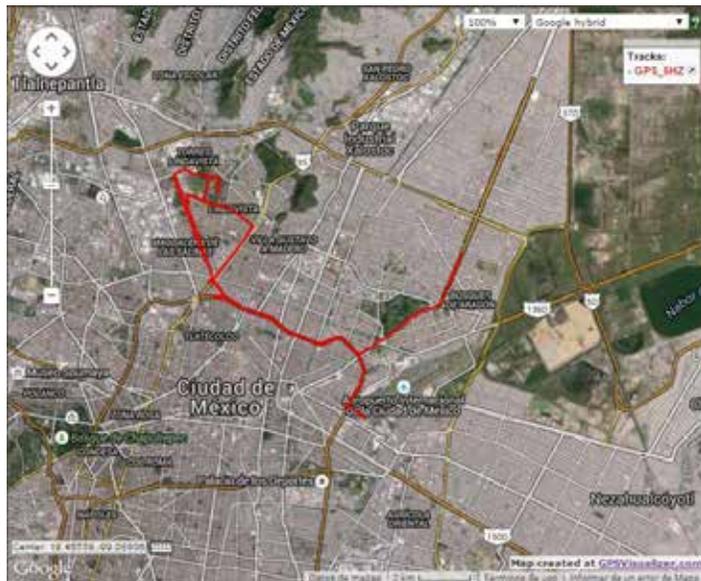


Figura 17

Ruta generada por el GPS.

Para visualizar la información de la ubicación almacenada en la Micro SD, los datos se cargan en la página Web www.gpsvisualizer.com donde se genera la ruta mediante la aplicación de Google Maps. En la Figura 17 se muestra un ruta de prueba trazada por el GPS.

Otra de las partes importantes para la comunicación, el control y la visualización de los datos obtenidos por el robot de manera inalámbrica, es la utilización de módulos de radiofrecuencia (RF) Xbee PRO S2B, los cuales trabajan con un protocolo de comunicación Zigbee para enviar la señal de uno al otro.

La visualización de los de datos se desarrolla en Labview una interfaz hombre-máquina, como se muestra en la Figura 18.

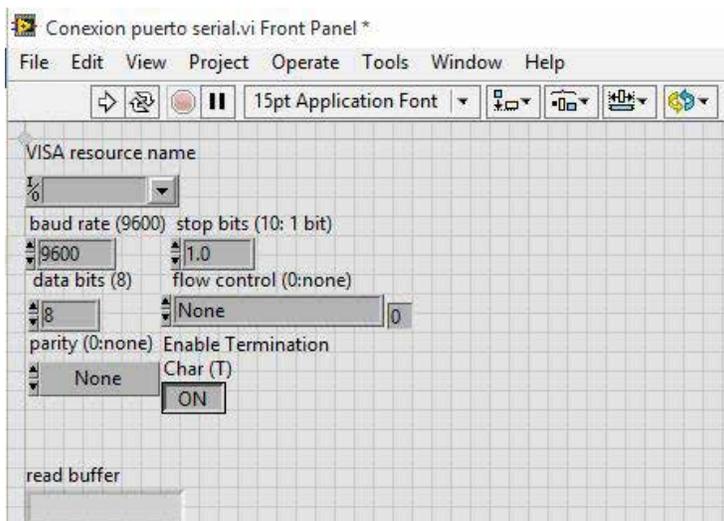


Figura 18

Interfaz gráfica en LabView de NI.

Además, se diseñó una tarjeta electrónica que se implementó en el robot móvil principal para el montaje de los sensores de gas, temperatura y humedad, ultrasónicos, comunicación inalámbrica, módulo GPS y drives para el mismo. El cerebro del sistema de toma de decisiones se implementa con un hardware embebido de Arduino Mega ADK, como se muestra en la Figura 19.

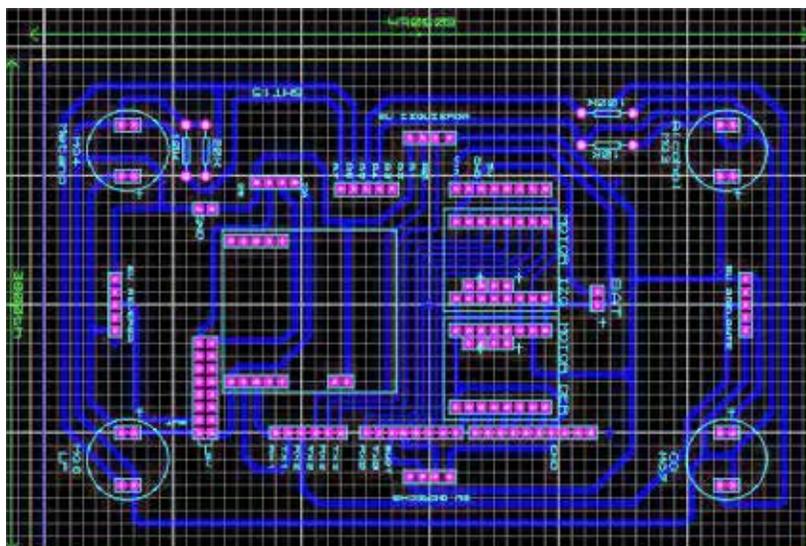


Figura 19

Diseño de PCB del sistema de toma de decisiones en el robot móvil.

El robot principal [6, 7, 25-27] realiza pruebas de campo con los algoritmos de programación, obteniendo los datos de los sensores, la toma de decisiones para la dirección de los motores, el sistema de comunicación y el control dentro del terreno agrícola, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20

Robot móvil funcionando con todos los elementos incluidos.

Conclusiones

La metodología del proyecto ha quedado concluida con las investigaciones realizadas dentro del tema que se abarca; sin embargo, como un método de mejoramiento, se continuará con la actualización de la información, de manera que ésta sea cada vez de mayor relevancia para la mejora del proyecto.

El cálculo y análisis para la cinemática del robot aún no se llevado a cabo, únicamente se ha demostrado la determinación de posición con un sistema de control de lazo abierto con rutinas previamente establecidas; empero, no tiene una efectividad al momento de girar y avanzar como se requiere para un movimiento óptimo del robot en el terreno agrícola.

La caracterización de los sensores de gas cuenta con un porcentaje de efectividad del 80%, debido a diferentes factores, como la humedad del lugar donde se realizaron las pruebas, el tiempo de calentamiento requerido para el SNO² y la pérdida de concentración exacta inyectada en el sensor. Todo esto de acuerdo con la hoja de datos del fabricante para poder obtener una gráfica similar.

Como se observó en las simulaciones de Matlab, la herramienta precargada para el diseño de redes neuronales facilitó el diseño de los algoritmos, pues sin ello, diseñar la red neuronal sería mucho muy complicado. Las gráficas que Matlab produce al entrenar las redes neuronales fueron muy efectivas, pues nos dan una noción de cómo se está comportando la red neuronal, si nos estamos aproximando a la solución del problema, o si estamos cometiendo errores en el diseño de la misma.

Un aspecto importante fue elegir la cantidad de capas ocultas, y las neuronas de cada capa, pues con la práctica, se entendió que al aumentar el número de neuronas en cualquier capa oculta, se incrementaba notablemente la conectividad de la red neuronal, y en consecuencia, el sistema podía converger en mayor tiempo, no obstante, era capaz de resolver problemas más complejos, lo cual en algunas ocasiones, otras redes muy simples no podían hacer.

Al emplear la red Backpropagation, fue posible procesar gran cantidad de datos en tiempo real, y en ningún momento se presentó lentitud por parte del sistema, lo cual demuestra que tanto el sistema Arduino, como la red neuronal, no tienen ningún problema al ser implementadas.

Al comparar los tipos de entrenamiento, se detectó la importancia de elegir adecuadamente el tipo de entrenamiento en el diseño de la red neuronal con la cual trabajaría, para lo cual se hicieron diversas pruebas y simulaciones. Con estos resultados, se observó cómo el entrenamiento Traincggf y Traincgp, fueron los más adecuados para diseñar nuestra red, debido a la rapidez con que llegó a la solución del problema planteado.

Para la comunicación GPS, se observó que utiliza protocolos muy rígidos, como el NMEA de la marina estadounidense, mediante comandos AT para poder obtener la información necesaria que se requería para la ubicación.

Se utilizó el software de fábrica para los módulos Xbee, a fin de agilizar su configuración y probar que estaban conectados entre ellos para enviar y recibir la información, aunque este procedimiento se puede realizar de igual manera por medio de comandos AT en HyperTerminal.

Se demostró que por medio de un ordenador es posible recibir la información inalámbricamente de los Xbee para su visualización. Se continuará con el diseño de la GUIDE para incluir todos los factores a monitorear, así como los botones de arranque y paro del motor, para su funcionamiento autónomo.

Por otra parte con respecto al uso de herramientas como la plataforma Arduino, se obtuvieron resultados muy satisfactorios, pues gracias al diseño de la placa Arduino Duemilanove, no fue necesario crear placas para conectar el microcontrolador, ni interfaz entre el microcontrolador y los distintos tipos de dispositivos que utilizamos, tanto xbee como sensores.

El contar con entradas analógicas, salidas digitales, comunicación Serial I2C, puerto serial, y serial-USB en un solo sistema, nos permite ahorrar trabajo, tiempo, dinero y espacio en la elaboración del proyecto, pues es un sistema bastante amigable con el programador/diseñador electrónico que desea realizar proyectos basados en esta plataforma.

En general, con este trabajo de investigación se ha explorado la utilización de las redes neuronales artificiales como una nueva herramienta para la solución de la problemática de la toma de decisiones de un robot explorador con trabajo colaborativo, del cual se obtuvieron resultados favorables, utilizando herramientas que hoy día facilitan la simulación de sistemas basados en células biológicas en ordenadores convencionales.

Bibliografía

- [1] Morales García, Isidro. (2013) Aplicaciones de la robótica en la agricultura, desarrolladas en Holanda. El Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda organiza una visita a diferentes Universidades e instituciones del país [on line], p.16 -19. Disponible desde < http://www.holanda.es/media/54341/reportaje_vr366.pdf>[Acceso 25 de febrero 2015].
- [2] Márquez ,Luis, y Gasparetto, Ettore. (2013) La robótica en la agricultura: Presente y futuro [Internet], Bolonia(Italia). Disponible desde: <http://www.clubofbologna.org/ew/documents/Articulo_Marquez-Gasparetto_2013.pdf>[Acceso 25 de febrero 2015].
- [3] García, J. A., y Vásquez, L. A. (2009). Los Robots en el Sector Agrícola [Internet], Universidad Politécnica de Madrid. Disponible desde: < http://www.disam.upm.es/-barrientos/Curso_Robots_Servicio/R_servicio/Agricultura_files/Robot%20en%20la%20Agricultura.pdf > [Acceso 25 de febrero 2015]
- [4] Pallás, A.R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal: prácticas*. 23a. Ed. España: Marcombo.
- [5] Torrente Artero, Óscar. (2013). *Arduino: curso práctico de formación*. México: Alfaomega.
- [6] Grift, Tony; Zhang, Qin; Kondo, Naoshi, y Ting, K.C. (2008). Journal of Biomechanics Engineering A review of automation and robotics for the bioindustry [Internet], Vol. 1, No. 1, p. 37-54. Disponible desde: <http://abe-research.illinois.edu/pubs/t_grift/automation_and_robotics_for_bioindustry.pdf><http://aclrar> [Acceso 15 de marzo 2015].<http://aclrar>
- [7] Bakker, Tijmen; Asselt van, Kees; Bontsema, Jan; Müller, Joachim, y Straten van, Gerrit. (2010). Journal of Terramechanics. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding [Internet], Volume 47, Issue 2, 2010, p. 63-73. Disponible desde <www.sciencedirect.com> [Acceso 15 de marzo 2015].<http://aclrar>
- [8] Ball, David; Ross, Patrick; English, Andrew; Patten, Tim; Upcroft Ben; Fitch, Robert; Sukkarieh, Salah; Wyeth, Gordon, y Corke, Peter. (2013) In proceedings of field and service robotics. Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture [Internet], Brisbane, Disponible desde: < <http://eprints.qut.edu.au/69162/>>[Acceso 15 de marzo 2015].
- [9] Emmi, Luis; González-de-Soto, Mariano; Pajares, Gonzalo; González-de-Santos, Pablo. (2014) The Scientific World Journal. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots [Internet], Volume 2014, p. 1-21. Disponible desde <<http://dx.doi.org/10.1155/2014/404059>> [Acceso 15 de marzo 2015].
- [10] Moreno, A.; Aguilar, J., y Luévano, A. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. Revista Mexicana de Agronegocios, Vol. XV, Núm. 29, julio-diciembre 2011, pp. 763-774. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A. C: Universidad Autónoma de la Laguna: UAAAN Torreón, México.
- [11] Armendáriz-Erives, S. 2007. Desafíos y riesgos agrícolas ante el calentamiento global. En Oportunidades y retos de la Ingeniería Agrícola ante la globalización y el cambio climático. UACH-URUZA. Pp. 73-79.
- [12] FIRA. 2007. Agricultura Protegida: Cultivo de tomate en invernadero, costos de cultivo y análisis de rentabilidad 2006. Dirección de Consultoría en Agronegocios Dirección Regional del Norte.
- [13] "Sistema de visión de apoyo a la navegación de un robot móvil en invernaderos". Disponible en <http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIX/pdf/279.pdf>
- [14] "Los robots en el sector Agrícola". Disponible en http://www.disam.upm.es/barrientos/Curso_Robots_Servicio/R_servicio/Agricultura_files/Robot%20en%20la%20Agricultura.pdf
- [15] Belforte G; Gay, P.; Ricauda, D. "Robotics for Improving Quality, Safety and Productivity in Intensive Agriculture: Challenges and Opportunities". Disponible en: http://www.intechopen.com/books/industrial_robotics_programming_simulation_and_applications/robotics_for_improving_quality_safety_and_productivity_in_intensive_agriculture_challenges_and_opp
- [16] Rodríguez, F. y Berenguel, M., (2004). *Control y Robótica en Agricultura*, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería.
- [17] Acaccia, G., Michelini, R.; Molfino, R., and Razzoli, R., "Mobile robots in greenhouse cultivation: inspection and treatment of plants." Vol. 1. *International Workshop on Advances in Service Robotics*. ASER, March 2003, Barbolino, Italy.
- [18] Kitamura, S. and Oka, K. "Recognition and cutting system of sweet pepper for picking robot in greenhouse horticulture." Vol. 4, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE , July 2005, Niagara Falls, Canada.
- [19] Belforte, G.; Deboli, R.; Gay, P.; Piccarolo, P., and Ricauda, D., "Robot design and testing for greenhouse applications." *Biosystems Engineering*. Vol. 95, No. 3, pp. 309-321, 2006.
- [20] Sammons, P.; Furukawa, T., and Bulgin, A. "Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse." Vol. 1, Australian Conference on Robotics and Automation, December 2005, pp. 1-9, Sydney , Australia.
- [21]. Van Heten, E.; Hemming, J.; Van Truiji, B.; Kornet, J.; Meuleman, J.; Bontsema, J., and Van Os, E. "An Autonomous Robot for Harvesting Cucumbers in Greenhouse." *Autonomous Robots*, Vol. 13, No. 3, pp. 241-258, November, 2002.
- [22] Subramanian, V.; Burks, T., and Singh, S. "Autonomous greenhouse sprayer vehicle using machine vision and ladar for steering control." *Applied Engineering in Agriculture* , vol. 21. no. 5, pp. 935-943, 2005.
- [23] Singh, S.; Burks, T., and Lee, W., "Autonomous robotic vehicle development for greenhouse spraying." *Transactions of the ASAE*, Vol. 48, No. 6, pp. 2355-2361, 2005.
- [24] Sánchez-Hermosilla, J.; Medina, R., and Vázquez, J., "Improvements in Pesticide Application in Greenhouse." *Workshop in Spray Application Technique in Fruit Growing*, 2003, Cuneo, Italy.
- [25] González, R.; Rodríguez, F.; Sánchez-Hermosilla, J., and Donaire, J., "Navigation Techniques for Mobile Robots in Greenhouse." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 25, No. 2, pp. 153-165. 2009.
- [26] Gonzalez, R. "Contributions to Modeling and Control of Mobile Robots in Off-Road Conditions." PhD Thesis, University of Almería, Almería, Spain. 2011.
- [27] Gonzalez, R.; Rodríguez, F.; Guzman, J., and Berenguel, M., "Comparative Study of Localization Techniques for Mobile Robots base on indirect Kalman Filter." *International Symposium on Robotics*. IFR, March, 2009, pp. 253-258. Barcelona, Spain.
- [28] Juárez, P.; Montoya, R.; Castro, R., and Sánchez, A. "Estructuras utilizadas en la agricultura protegida". *Revista Fuente*, Año 3, No. 8 Julio-Septiembre 2011 ISSN 2007-0713
- [29] Castellano, J. 2007. "Perspectivas de la agricultura protegida en México". En: Segunda Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Guadalajara, México [consultado 2015 abril 23]. Disponible en: http://www.rniaf.org.mx/2007/memoria/ponencias/protegida/p4_perspectivas1.pdf
- [30] Moreno-Pérez, E.C. 2007 *Agricultura protegida para la producción de hortalizas*. Segunda Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Guadalajara, México. [consultado 2015 mayo 26]. Disponible en: http://www.rniaf.org.mx/2007/memoria/ponencias/protegida/p3_produccion.pdf
- [31] Sánchez del Castillo, F. 2007. Proyecto Educativo de la Licenciatura Ingeniero Agrónomo en Horticultura Protegida. Chapingo, México. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo, 86 pág.