

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA.**



**SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y SUPERVISIÓN DE MISIONES
PARA ROBOTS MÓVILES TERRESTRES AGRÍCOLAS.**



ALAN DEYUI VERA MUÑOZ.

PROYECTO DE HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN – CHILE

2018

SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y SUPERVISIÓN DE MISIONES PARA ROBOTS MÓVILES TERRESTRES AGRÍCOLAS.

Aprobado por:

Christian Correa Farías
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Fernando Reyes Aroca
Ingeniero Civil Metalúrgico, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Wilson Esquivel Flores
Ingeniero Civil Mecánico, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

David Lara Castell
Ingeniero Civil Eléctrico, Dr.
Profesor Asistente

Director de Departamento

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Decano

ÍNDICE DE MATERIAS.

	Página
RESUMEN.	1
SUMMARY.	2
INTRODUCCIÓN.	3
METODOLOGÍA.	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	19
CONCLUSIONES.	31
LITERATURA CITADA.	32



ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1:	Robot omnidireccional Uranus, dotado con ruedas suecas. Muir y Neuman (1987).	4
Figura 2:	Plataforma omnidireccional implementada por Bakker et al. (2010).	4
Figura 3:	Estructura del Robot BACO. Fuente propia.	7
Figura 4:	Detalle del avance del robot BACO por sobre la hilera. Fuente propia.	10
Figura 5:	Zona sobre la que se planificó la misión de prueba para el robot BACO. Google Earth.	19
Figura 6:	Paneles que conforman el apartado de ajustes del módulo de planificación de misiones: para crear grillas (A), para dibujar rutas (B), para suavizar la ruta óptima (C) y panel para visualizar cordendas de la ruta óptima (D). Fuente propia. Fuente propia.	20
Figura 7:	Zona de visualización de la imagen de la zona de trabajo, perteneciente al módulo de planificación de misión. Fuente propia.	22
Figura 8:	Zonas ocupadas (amarillo) y libres (sin relleno) para la simulación de una misión. Fuente propia. ..	23
Figura 9:	Ruta óptima determinada por el algoritmo A* (azul) para el escenario definido sobre la imagen de la zona de trabajo. La celda en color rojo indica el origen de la misión. Fuente propia.	25
Figura 10:	Trayectoria suavizada con curvas de Bézier de tercer orden (rojo) para los puntos de control determinados con A*. Fuente propia.	25
Figura 11:	Módulo de supervisión y tele-operación integrado por el panel de supervisión de motores de avance y giro (A), panel de visualización del robot sobre la zona de trabajo (B), panel de tele-operación (C) y panel de comunicación (D). Fuente propia.	26
Figura 12:	Detalle de las variables del robot que se supervisan durante la ejecución de la misión. Fuente propia.	27
Figura 13:	Ventana del módulo de supervisión que permite visualizar al robot dentro de la zona de trabajo mientras ejecuta la misión. Fuente propia.	28

Figura 14:	Apariencia del módulo de tele-operación. Detalle del Joystick que permite dirigir al robot. Un par de botones permiten seleccionar entre el modo de conducción automático y manual. Fuente propia.	29
------------	--	----

Página

Figura 15:	Módulo de comunicación, en el cual es posible seleccionar el puerto de comunicaciones (Puerto COM) a emplear, así como la velocidad de comunicación. Fuente propia.	30
------------	--	----



SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y SUPERVISIÓN DE MISIONES PARA ROBOTS MÓVILES TERRESTRES AGRÍCOLAS

MISSION PLANNING AND SUPERVISION SYSTEM FOR GROUND AGRICULTURAL MOBILE ROBOTS

Palabras índice adicionales: Robot, misión, telemetría

RESUMEN.

Con el propósito de proveer una navegación óptima y segura para robots agrícolas, se implementó una serie de algoritmos en un software, que no solo permite planificar rutas óptimas y generar trayectorias suaves, sino que además proporciona una interface para el usuario. Para la generación de rutas óptimas se implementó el algoritmo denominado A*, mientras que para el suavizado de la trayectoria se implementó el algoritmo de Bézier. El software permite demarcar, a partir de una imagen aérea, las hileras del cultivo u otros obstáculos presentes. Permite, además una vez generada la ruta óptima, suavizarla y geo-referenciarla, generando una secuencia de coordenadas geográficas, por las cuales el robot deberá pasar. El software permite visualizar tanto la ruta a seguir como los parámetros de operación. Adicionalmente, el software permite la tele-operación del robot. El sistema es capaz de generar trayectorias suaves con una resolución de hasta un centímetro, en menos de un segundo, realizar el monitoreo y control remoto del robot con frecuencias de 2 Hz, lo que lo hace apto para robots en labores agrícolas.

SUMMARY.

A series of algorithms were implemented in a software in order to provide an optimal and safe navigation for agricultural robots. The system does not only allow planning optimal routes and generating smooth trajectories, but it also supplies a user's interface. The algorithm called A * was implemented for the generation of optimal routes, while the algorithm called Bezier was implemented to smooth the trajectory. The software allows demarcating crop rows or other obstacles from an aerial image. Once the optimal route is generated, this can also be smoothed and geo-referenced to provide a sequence of geographic coordinates through which the robot must pass. In addition, the software allows visualization of the routes to be followed, parameter operation, and also robot tele-operation. The system is capable of generating smooth trajectories (with a resolution of up to one centimeter in less than a second), and perform the monitoring and remote control of the robot with frequencies of 2 Hz. Therefore, it is suitable for robots in agricultural tasks.

INTRODUCCIÓN.

Según Khalil y Dombre (2002), un robot es un sistema mecánico multipropósito con control automático, reprogramable, con varios grados de libertad y que puede estar anclado a un lugar o ser móvil. Será móvil si es capaz de desplazarse a través del terreno en forma autónoma, Ollero (2001a).

Entre los robots móviles están aquellos que se desplazan utilizando ruedas, existiendo diversas arquitecturas para este tipo de robots, entre ellas la omnidireccional, Ollero (2001b). Este tipo de arquitectura es de especial interés debido a que permite al robot desplazarse en todas direcciones y en cualquier momento, sin necesidad de re-direccionar su cuerpo sino solo sus ruedas, Siegwart y Nourbakhsh (2004). Esta característica le permite navegar en entornos con espacios reducidos como cultivos permanentes de alta densidad de plantación, como sucede en los viñedos. Muir y Neuman (1987) basaron su trabajo en el robot omnidireccional Uranus (Figura 1), equipado con ruedas suecas, sin embargo, este tipo de ruedas tiene limitaciones referidas al tipo de superficie sobre la cual pueden desplazarse. En efecto, no pueden hacerlo sobre tierra o en terrenos irregulares ya que las ruedas se obstruyen.

De cara a subsanar los problemas antes planteados, se han propuesto otras configuraciones omnidireccionales, entre ellas, una basada en ruedas convencionales como las utilizadas por Bakker et al. (2010) (Figura 2). Este tipo de configuración confiere al robot capacidades todo terreno, habilitándolo para operar en entornos agrícolas.



Figura 1. Robot omnidireccional Uranus, dotado con ruedas suecas. Muir y Neuman (1987).



Figura 2. Plataforma omnidireccional implementada por Bakker et al. (2010).

Por otra parte, para que un robot móvil se desplace de un punto a otro, es necesario planificar y seguir una ruta que sea óptima. En efecto, la planificación de una misión tiene por objetivo determinar la ruta óptima que un

robot deberá seguir para ir desde un punto de partida a otro de destino, sin chocar ni desviarse. Debe notarse que la planificación puede ser aplicada tanto en entornos estructurados como no estructurados, en otras palabras, estáticos o variables en el tiempo. En particular, los entornos agrícolas se consideran entornos estructurados.

Adicionalmente, debe notarse que en un entorno estructurado generalmente existen múltiples rutas para llegar a un mismo destino, surgiendo la necesidad de implementar un procedimiento que permita seleccionar aquella que cumpla la misión de modo óptimo. En efecto, el concepto de ruta óptima dependerá de el o los parámetros que se deseen optimizar. Por ejemplo, una ruta puede ser óptima para el parámetro distancia si, entre todas las posibles rutas que permiten completar la misión, es la más corta. Sin embargo, la misma ruta puede no ser la mejor alternativa si el criterio de optimización es el consumo eléctrico de sus motores, debido por ejemplo al tipo de suelo.

Como se ha señalado, es necesario disponer de una herramienta que permita escoger la ruta óptima. Es por ello que se han desarrollado diversos algoritmos de búsqueda de rutas óptimas, sin embargo, uno de los más utilizados es el denominado A* (léase A asterisco). Entre sus características está asegurar que, en caso de existir una ruta que permita completar la misión, la encontrará y será óptima, Hart *et al.* (1968).

El resultado de aplicar un algoritmo de búsqueda sobre el terreno de la misión es un conjunto de puntos inconexos, llamados puntos de control, por los que el robot deberá pasar en orden para completar su misión. Sin embargo, los

robots móviles no solo necesitan conocer los puntos de control, sino que además requieren una trayectoria suave que conecte entre sí los puntos de control.

El suavizado de la trayectoria tiene por objetivo transformar la trayectoria en una curva que debe cumplir con dos requisitos: conectar los puntos de control y tener una forma tal que el robot pueda seguirla a velocidad constante. Seguir la trayectoria a velocidad constante asegura un menor consumo de energía del sistema impulsor, además de evitar giros bruscos o incluso detenciones durante el seguimiento de la trayectoria.

Uno de los algoritmos de suavizado de curvas más utilizados es el de las curvas de Bézier de tercer orden, ya que permite unir los puntos de control con curvas suaves con un bajo costo computacional, Choi *et al* (2009).

Un ejemplo de robot agrícola es el robot BACO, desarrollado en la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción (Figura 3). Es un robot omnidireccional diseñado para desenvolverse en cultivos con manejo en hileras, en particular sobre viñas dispuestas en espalderas.



Figura 3. Estructura del Robot BACO. Fuente propia.

Para su operación, requiere de un sistema que permita planificar una misión dentro de un viñedo, siguiendo una trayectoria suave que pueda ser ejecutada a velocidad constante. Se requiere también monitorear su estado y ubicación dentro del viñedo durante el desarrollo de la misión. Por último, se requiere operar el robot en forma remota cuando sea necesario desplazarlo sin que necesariamente esté desarrollando una misión. Es por lo anterior que en este trabajo se pretende desarrollar un software de planificación y supervisión de misiones y tele-operación para el robot BACO que permita:

- Planificar una misión dentro de un viñedo dispuesto en espalderas.
- Generar una trayectoria suave que el robot pueda seguir con velocidad constante.

- Supervisar el estado de la misión visualizando las coordenadas UTM del robot, y consumo eléctrico, velocidad angular y orientación de las ruedas.
- Tele-operar el robot enviándole una trama adecuada que permita modificar la orientación y velocidad angular de las ruedas.



METODOLOGÍA.

Con el propósito de implementar los algoritmos de planificación y suavizado de trayectorias, se desarrolló un software de planificación, supervisión de misiones y tele-operación para el robot BACO. El software está compuesto por dos módulos, uno dedicado a la planificación de misión y otro a la supervisión de la misión y tele-operación del robot. El software se desarrolló en la plataforma Visual Studio Community 2017 de Microsoft, en lenguaje Visual C#. Para una mejor comprensión de la metodología, es necesario describir la arquitectura y modo de operación del robot BACO.

Antecedentes del robot BACO.

El robot BACO fue diseñado para operar en viñedos dispuestos en espalderas. Dichos viñedos se caracterizan por restringir la movilidad, debido al reducido espacio para maniobras y giros, razón por la cual su arquitectura es omnidireccional. El robot se desplaza con su vientre sobre la hilera (Figura 4), siendo esta característica crucial para entender las restricciones en la generación de la ruta a seguir.

Módulo de planificación.

El módulo de planificación abarca la generación de una ruta óptima, suavizado y comunicación de ésta al robot. Para generar la ruta óptima se escogió el algoritmo de búsqueda en grafos A*, ampliamente utilizado para resolver problemas de planificación de misiones. El resultado de aplicar el algoritmo

sobre la imagen de la zona de trabajo de la misión, es un conjunto de puntos denominados puntos de control, por los que el robot debe pasar para completar la misión.

Para la implementación de este algoritmo, el sistema requiere ciertas configuraciones previas, las que se describen a continuación.



Figura 4. Detalle del avance del robot BACO por sobre la hilera. (Fuente propia).

Selección manual de la zona de trabajo. Para localizar y seleccionar la zona de trabajo se utilizó el programa Google Earth, desde el cual se extrajo una imagen de la zona de trabajo. Una vez obtenida la imagen se determina el ángulo de las hileras respecto al norte verdadero. El procedimiento consiste en dibujar una línea sobre una de las hileras de la zona de trabajo, utilizando la herramienta “rule” de Google Earth la cual determina el valor del parámetro “heading”, que corresponde al ángulo en sentido dextrógiro respecto al norte. En específico, es el ángulo que forman las hileras de la zona de trabajo

respecto al norte verdadero. La importancia de este ángulo será explicada más adelante.

El usuario debe seleccionar un punto sobre la zona de trabajo para utilizarlo como origen del sistema coordenado que se montará sobre ésta. Este punto debe ubicarse en la esquina superior izquierda de la zona de trabajo y sus coordenadas UTM deben ser conocidas.

Por último, la zona de trabajo debe rotarse hasta lograr orientar las hileras verticalmente.

Una vez definida la zona de trabajo, se guarda como un archivo de imagen con la extensión “.jpg” en un directorio predefinido desde el cual es leída por el software de planificación.

División de la zona de trabajo. El objetivo de esta etapa es dividir la imagen de la zona de trabajo (en adelante imagen) en partes más pequeñas que permitan identificar y marcar las zonas ocupadas. En este punto, es importante tener presente que, por la forma en que el robot se desplaza sobre la hilera, las zonas ocupadas serán las calles y no las hileras como naturalmente cabría pensar.

Sobre la imagen se aplicó en forma automática una grilla cuadrada. El usuario puede modificar el tamaño de la cuadrícula mediante un botón habilitado con tal función. Es también tarea del usuario definir un tamaño de cuadrícula adecuado que permita contener, sin exagerar, calles y obstáculos presentes en la imagen.

El efecto de aplicar la grilla es una imagen dividida en un arreglo matricial de “n” cuadrículas horizontales por “m” cuadrículas verticales, ambas numeradas respecto al punto de referencia definido por el usuario.

Selección manual de las cuadrículas ocupadas. Una vez generada la grilla sobre la imagen, es necesario determinar las zonas no disponibles para el tránsito del robot.

Contrario a la lógica, las zonas ocupadas serán las calles y no las hileras. Esto porque el robot BACO se desplaza sobre la hilera y no entre hileras. Sin embargo, sus ruedas sí ocupan parte de las calles circundantes a la hilera.

La selección de las zonas ocupadas se hizo manualmente en base al siguiente criterio: una cuadrícula se considerará no disponible para el tránsito del robot si está parcial o totalmente ocupada por un obstáculo. Se considerarán obstáculos tanto hileras como cualquier objeto que permanezca estático dentro de la zona de trabajo.

Ejecución del algoritmo de búsqueda A*. Para implementar el algoritmo A*, primero se deben establecer el o los parámetros que se optimizarán. En este trabajo se optimizó la distancia recorrida por el robot. Se permitirá al robot avanzar a través de las cuadrículas tanto en línea recta como en diagonal, pudiendo el usuario seleccionar una u otra mediante un botón.

El resultado de ejecutar el algoritmo A* sobre la imagen es una serie de puntos que el robot deberá seguir en orden para completar la misión. En efecto, las

coordenadas de dichos puntos corresponden a los centros de las cuadrículas que el robot deberá traspasar para completar la misión.

Los puntos generados tienen el formato $P(j;i)$, punto que identifica el centro de la cuadrícula ubicada en la fila j -ésima y columna i -ésima respecto al punto de referencia. Por ejemplo, el punto R (3;5) hace referencia al centro de la cuadrícula ubicada en la fila 3 y columna 5 respecto al origen. Se debe notar que estos puntos carecen de referencia geográfica, salvedad que se resuelve a continuación.

Georreferenciación de los puntos de control. Para asignar una referencia geográfica, latitud y longitud, a los puntos generados por el algoritmo A*, se requiere rotarlos en sentido contrario al que se rotó la imagen en la etapa de selección manual de la zona de trabajo. Luego, es necesario georreferenciarlos respecto al punto que el usuario escogió como referencia. La ecuación para rotar pares ordenados se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad [1]$$

donde:

θ : ángulo de rotación respecto al origen (radianes).

x : abscisa del punto que se desea rotar.

y : ordenada del punto que se desea rotar.

x' : abscisa del punto rotado.

y' : ordenada del punto rotado.

La ecuación para geo-referenciar los puntos ya rotados es:

$$T = (LON + l*(j-0.5) ; LAT - l*(i-0.5)) \quad [2]$$

donde:

LAT : Latitud del punto seleccionado como referencia (UTM).

LON : Longitud del punto seleccionado como referencia (UTM).

l : Dimensión de la cuadrícula (m).

j : Fila de la cuadrícula (j = 1...n).

i : Columna de la cuadrícula (i = 1...m).

Suavizado con curvas de Bézier.

La ruta óptima generada por el algoritmo A*, como se ha señalado, está compuesta por una serie de puntos inconexos que no proveen de una trayectoria suave que los una y que el robot pueda seguir. Por ello, estos puntos serán unidos mediante una curva suave, creada mediante curvas de Bézier, generando de este modo una trayectoria que el robot pueda seguir.

Las curvas de Bézier son un algoritmo que permite unir puntos mediante curvas suaves de grado 3. Aunque existen otros algoritmos para generación de curvas a partir de una serie de puntos, como las Splines cúbicas, se utilizó Bézier ya que demanda menos recursos computacionales, lo que permite su cálculo de forma dinámica.

Debe notarse que, aunque Bézier ofrece una curva suave, ésta debe ser segmentada para que, a partir de los segmentos rectos, pueda determinarse la orientación de las ruedas, así como la distancia que deben recorrer.

Comunicación de la ruta óptima al robot. La ruta óptima, ya suavizada, se comunica al robot en forma inalámbrica, como una serie de datos ordenados empaquetados en un arreglo, que el robot deberá leer e interpretar como un movimiento en una dirección y a velocidad determinadas. La información incluida en el arreglo es: latitud y longitud del punto objetivo, velocidad angular de la rueda 1, velocidad angular de la rueda 2, velocidad angular de la rueda 3, velocidad angular de la rueda 4, orientación de la rueda 1, orientación de la rueda 2, orientación de la rueda 3 y orientación de la rueda 4.

Debido a que el robot puede operar en modo manual o automático, debe comunicar también información al respecto. El formato del arreglo se muestra en la Ecuación [3]. Cada paquete de información enviado al robot debe terminar con los caracteres “\n”, que se interpretan como final del arreglo.

Para la transmisión de información desde y hacia el robot se utilizó el equipo de radio XBEE PRO, con un transmisor dispuesto en el robot y otro conectado al computador que alojará el software. La velocidad de transmisión se configuró a 115200bps y el puerto serie en el formato 8N1: 8 bits de datos, sin bit de paridad y un bit de parada.

$$R = ID01, A, LAT, LON, W1, \dots, OR1, \dots \backslash n \quad [3]$$

donde:

ID01 = Identificador del arreglo de ruta óptima.

A = Modo de operación automático

LAT = Latitud (UTM).

LON = Longitud (UTM).

W_i = Velocidad angular de las ruedas en RPM ($i=1\dots4$).

OR_i = Orientación de las ruedas en radianes ($i=1\dots4$).

Módulo de supervisión.

Este módulo permite supervisar el comportamiento del robot mostrando por pantalla variables de interés del robot durante el desarrollo de la misión. Las variables supervisadas son: velocidad angular de cada rueda, orientación de cada rueda, corriente y voltaje de los motores que impulsan las ruedas motrices y posición del robot en coordenadas UTM.

A bordo del robot, un microcontrolador se encarga de empaquetar la información en un arreglo con formato predefinido. La transmisión del arreglo es por comunicación inalámbrica desde el módulo XBEE PRO a bordo del robot hacia el XBEE PRO conectado al computador donde se aloja el software de planificación de misiones.

Del mismo modo en que se comunica la ruta óptima al robot, la información de supervisión es empaquetada en un arreglo con un identificador único que el transmisor XBEE PRO conectado al computador reconoce. La Ecuación [4] muestra el formato del arreglo.

$$S = ID02, W_i, \dots, OR_i, \dots, CMA_i, \dots, CMG_i, \dots, LAT, LON \backslash n \quad [4]$$

donde:

ID02 = Identificador del arreglo de supervisión.

W_i = Velocidad angular de las ruedas ($i = 1\dots4$).

OR_i = Orientación de las ruedas ($i = 1\dots4$).

CMA_i = Corriente en Amperes en los motores de avance ($i = 1...4$).

CMG_i = Corriente en Amperes en los motores de giro ($i = 1...4$).

LAT = Latitud geográfica del robot (UTM).

LON = Longitud geográfica del robot (UTM)

Módulo de tele-operación.

El software incorporará un módulo de teleoperación que permite tomar el control del robot, pasando del modo autónomo al modo manual de control, con el objetivo de efectuar tareas como guardar, descargar o posicionar el robot dentro del huerto en el caso de ser necesario.

El control manual se hará tele-operando las ruedas del robot. Para orientar el movimiento de la plataforma, se indicará la velocidad angular y orientación de cada rueda. La Ecuación [5] describe el arreglo con la información necesaria para la teleoperación.

$$T = ID03, W_i, \dots, OR_i, \dots, LAT, LON \backslash n \quad [5]$$

donde:

$ID03$ = Identificador del arreglo de teleoperación.

W_i = Velocidad angular de las ruedas ($i = 1...4$).

OR_i = Orientación de las ruedas ($i = 1...4$).

LAT = Latitud geográfica del robot (UTM).

LON = Longitud geográfica del robot (UTM)

La transmisión del arreglo de teleoperación se hará de manera análoga a como se describió para el arreglo de ruta óptima excepto por el identificador único

que indicará al robot que se trata de una trama de teleoperación. Un microcontrolador a bordo interpretará e implementará la información comunicada en el arreglo.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La prueba del software se realizó sobre una zona de trabajo ubicada en las dependencias de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, sobre un cultivo de viñas dispuestas en espalderas perteneciente a la facultad de Agronomía de la Universidad (Figura 5).

A continuación, se describen los resultados del trabajo desarrollado.



Figura 5. Zona sobre la que se planificó la misión de prueba para el robot BACO. Google Earth.

Planificador de misiones.

El módulo de planificación de misiones se dividió en dos apartados, uno dedicado al ajuste de parámetros de planificación de la misión y otro a la visualización del escenario de la misión.

El apartado de ajustes (Figura 6) está constituido por cuatro paneles: panel de creación de grilla (A), panel de creación de escenario (B), panel de suavizado (C) y panel de visualización de coordenadas (D).

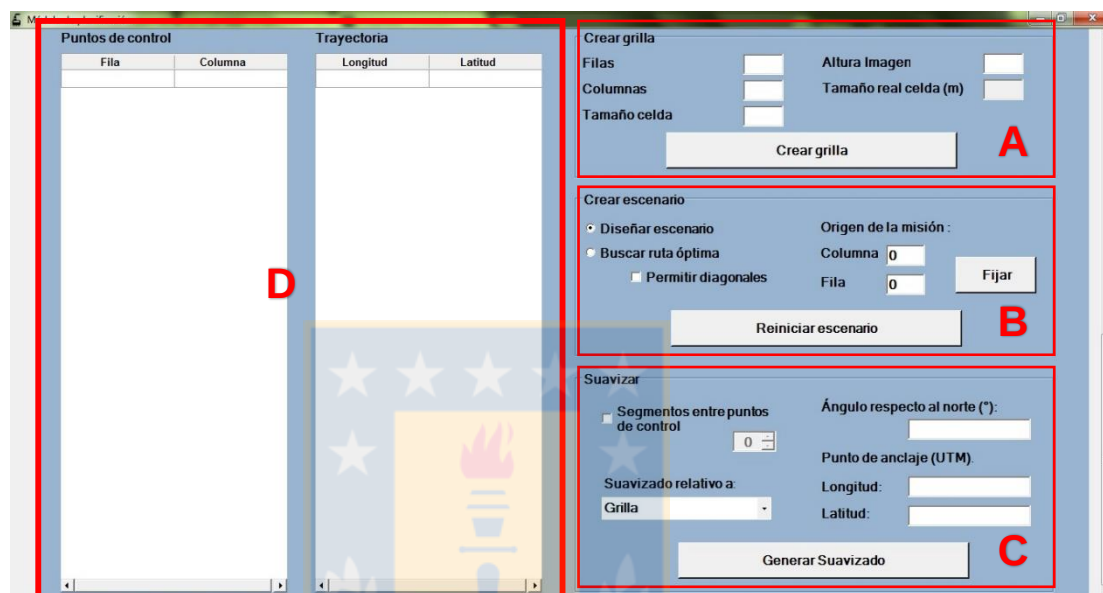


Figura 6. Paneles que conforman el apartado de ajustes del módulo de planificación de misiones: para crear grillas (A), para dibujar rutas (B), para suavizar la ruta óptima (C) y panel para visualizar cordendas de la ruta óptima (D). Fuente propia.

La zona de ajustes de parámetros permite configurar la misión (paneles A, B y C en la Figura 6) y visualizar las coordenadas de los puntos de control y las coordenadas geográficas de los puntos que conforman la trayectoria suavizada (panel D en la Figura 6). Esta zona está conformada por tres paneles de configuración. El panel A “Crear grilla”, permite definir la cantidad de filas, columnas y el tamaño relativo a la imagen de la zona de trabajo de la cuadrícula. Ingresando la altura real de la imagen, se calcula el tamaño real

que tiene cada cuadrícula, entregando al usuario una noción del área que ésta abarca.

El panel B “Crear escenario”, permite definir el escenario de la misión. Los parámetros “fila” y “columna” permiten seleccionar la ubicación del punto de inicio de la misión. La opción “Diseñar escenario” permite cambiar el estado de las cuadrículas de la grilla de libres a ocupadas y a la inversa haciendo click con el puntero del mouse sobre ellas. Una cuadrícula en color amarillo indica que está ocupada. La opción “Buscar ruta óptima” permite buscar la ruta óptima para la misión utilizando por defecto distancia ciudad, pudiendo cambiar a distancia euclidiana marcando la opción “Permitir diagonales”. La determinación de la ruta óptima es en tiempo real y se consigue ubicando el puntero del mouse sobre la casilla que el usuario defina como destino de la misión. Al hacer click se genera en el panel D un reporte con las coordenadas de los puntos de control relativas a la grilla.

Una vez creado el escenario de la misión, el panel C “Suavizar” entrega opciones para determinar la trayectoria suavizada, ya sea relativa a las coordenadas de la grilla o en coordenadas geográficas. La opción “Segmentos entre puntos de control” define la cantidad de puntos intermedios que conectarán puntos de control consecutivos. El suavizado de la ruta óptima se puede aplicar relativo a la grilla o en coordenadas geográficas. En caso que se escoga obtener la trayectoria suavizada en coordenadas geográficas, es necesario ingresar el ángulo que las hileras forman respecto al norte verdadero y las coordenadas UTM del punto escogido como anclaje. Una tabla en panel D

permite visualizar el listado de coordenadas UTM que conforman la trayectoria suavizada.

La zona de visualización del módulo de planificación (Figura 7) permite al usuario cargar la imagen de la zona de trabajo, visualizar la grilla, definir las zonas libres y ocupadas de la misión, visualizar la ruta óptima y el suavizado de la trayectoria que finalmetente seguirá el robot a través de la zona de trabajo.

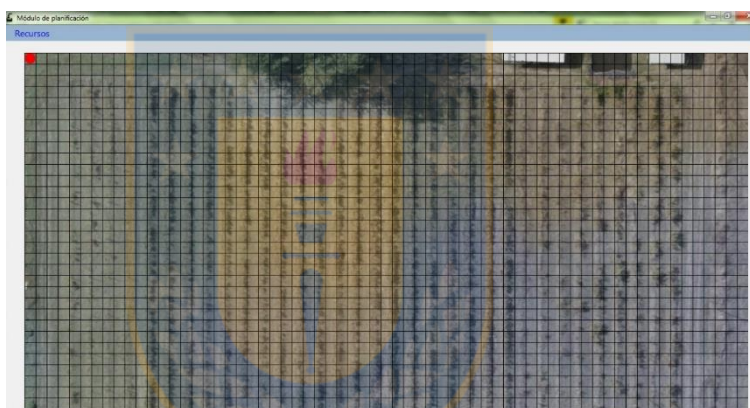


Figura 7. Apartado de visualización de la imagen de la zona de trabajo, perteneciente al módulo de planificación de misión. Fuente propia.

La Figura 8 muestra en color amarillo las celdas seleccionadas como obstáculos para una misión sobre la zona de trabajo. La celda resaltada con color rojo designa el origen de la misión. Es de vital importancia y responsabilidad del usuario definir las zonas ocupadas de tal forma que el robot circule por las cuadrículas deseadas.



Figura 8. Cuadrículas ocupadas (amarillo) y libres (sin relleno) sobre la imagen de la zona de trabajo. Fuente propia.

En la Figura 9 se aprecia en color azul las celdas que conforman la ruta óptima determinada con el algoritmo A* y distancia ciudad para el escenario definido en la Figura 8. La ruta se recorre comenzando en el celda marcada con color rojo.

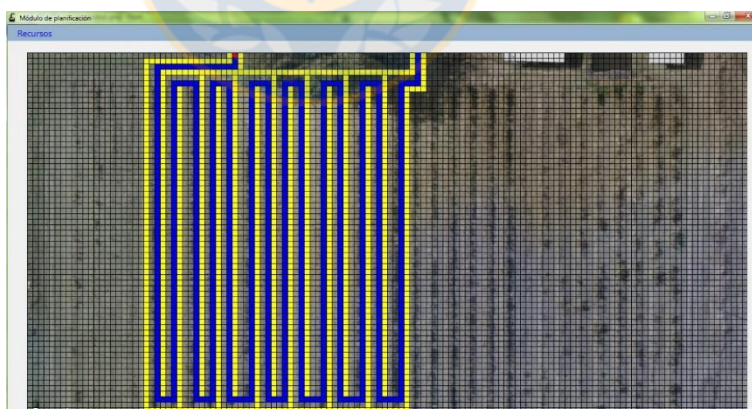


Figura 9. Ruta óptima determinada por el algoritmo A* (azul) para el escenario definido sobre la imagen de la zona de trabajo. La celda en color rojo indica el origen de la misión. Fuente propia.

La Figura 10 muestra en color rojo la trayectoria determinada por el software de planificación para la ruta óptima obtenida. Esta etapa es crucial para el desarrollo de la misión ya que finalmente es esta trayectoria la que conducirá al robot a través de la zona de trabajo. La figura además muestra en detalle como las curvas de Bézier suavizan los cambios de dirección permitiendo al robot realizar la misión con velocidad constante.

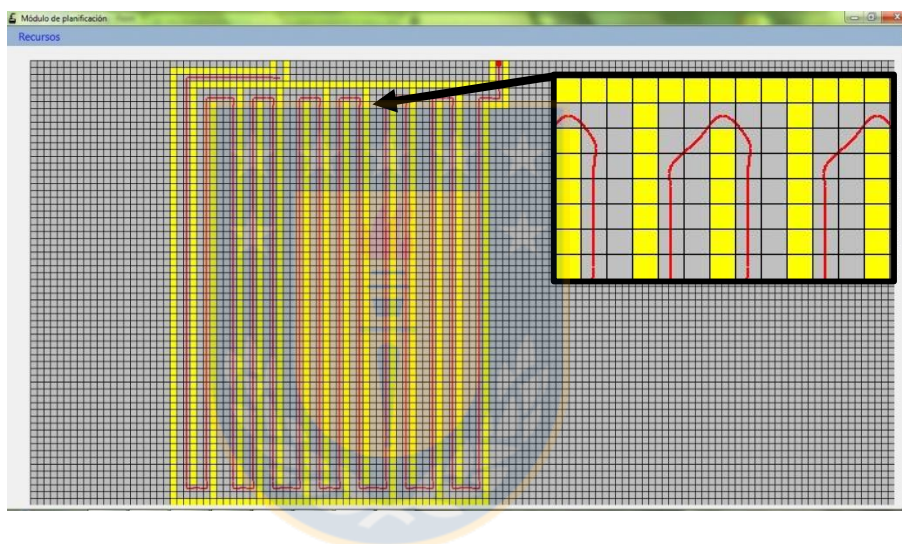


Figura 10. Trayectoria suavizada con curvas de Bézier de tercer orden (rojo) para los puntos de control determinados con A*. Fuente propia.

Debe notarse que la trayectoria suave generada depende de los obstáculos seleccionados. En otras palabras, si el proceso de demarcación de obstáculos no fue realizado de un modo apropiado, la trayectoria podría pasar muy cerca de un obstáculo, razón por la cual los obstáculos deben contar con una zona de seguridad, sobre todo en las curvas, para garantizar que la trayectoria generada no induzca al robot a un choque. De ahí, que el tamaño de la grilla

debe ser tal que permita, mediante el demarcado de obstáculos, establecer zonas adyacentes como zonas ocupadas.

Por ejemplo, si el tamaño de las celdas es de un metro, cada celda cubre por completo el ancho de una espaldera, sin embargo, esto no permite demarcar correctamente espalderas no alineadas o que no sean perfectamente rectas.

Así, mientras más pequeño el tamaño de la celda, mejora la capacidad de demarcar obstáculos y zonas de seguridad, con el costo de aumentar considerablemente el tiempo de demarcado.

Módulo de supervisión y tele-operación.

La Figura 11 muestra el módulo de supervisión y tele-operación. A continuación, se analizará por separado la funcionalidad de ambos módulos.

Módulo de supervisión. Este módulo permite adquirir remotamente información del estado del robot mientras se desarrolla la misión. Para el robot, como un todo, se visualiza el voltaje del conjunto de baterías que alimentan el sistema impulsor y de orientación. Para los motores de avance, encargados de proporcionar tracción, se informa: velocidad angular (RPM) y consumo de corriente (A). Para los motores de giro, aquellos que orientan las ruedas, se informa su orientación (RPM) y el consumo de corriente (Figura 12).

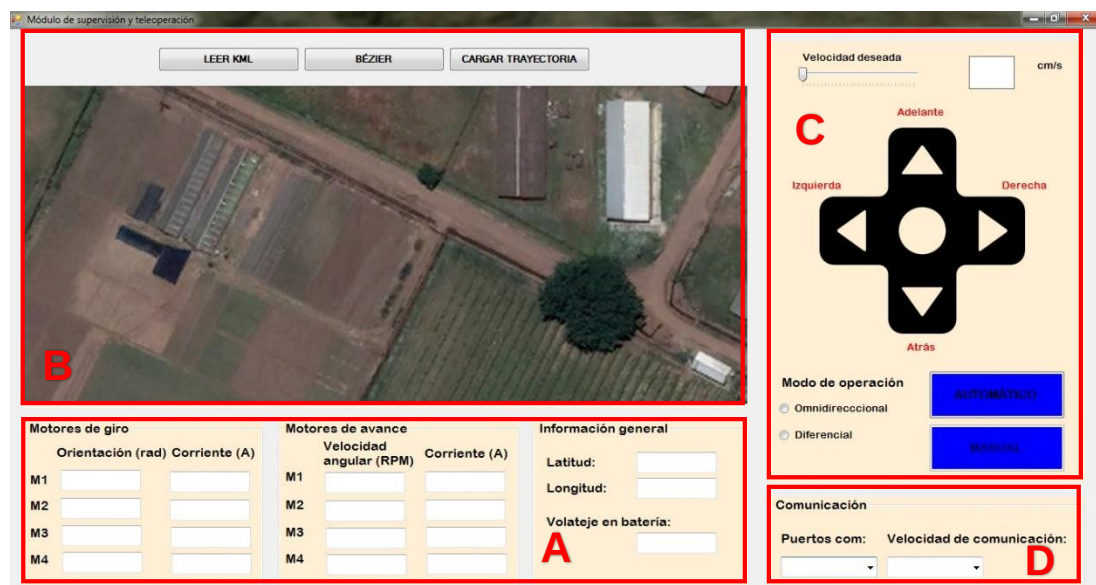


Figura 11. Módulo de supervisión y tele-operación integrado por el panel de supervisión de motores de avance y giro (A), panel de visualización del robot sobre la zona de trabajo (B), panel de tele-operación (C) y panel de comunicación (D). Fuente propia.



Figura 12. Detalle de las variables del robot que se supervisan durante la ejecución de la misión. Fuente propia.

El módulo está dotado además de una ventana que permite visualizar la ubicación en tiempo real del robot en la zona de trabajo, así como la trayectoria suavizada (Figura 13).

A modo de simplificar la demarcación de la ruta a seguir, el software ofrece un módulo que permite importar rutas creadas en Google Earth, lo que permite

utilizar todas las herramientas de dicho software para crear rutas, que, aunque no sean óptimas, son fáciles de hacer.

En efecto, el módulo de supervisión permite ingresar información de coordenadas geográficas a través de un archivo de extensión “.kml”. El botón “LEER KML”, permite cargar un archivo con dicha extensión, que para el caso contendrá la colección de puntos de control.

Por otra parte, el botón “BÉZIER” toma la información del archivo “.kml”, extrae automáticamente las coordenadas de los puntos que conforman la ruta y realiza el suavizado de los puntos, generando una trayectoria suave.

En esta interface, el número de segmentos intermedios es fijo e igual a 5, ya que, con curvas de Bézier de tercer orden, se generan segmentos de 20cm, suficientes para el caso más crítico, que se enfrenta al dar una curva cerrada al final de cada hilera.

Por último, el botón “CARGAR TRAYECTORIA” permite desplegar la trayectoria suavizada sobre la vista de visualización.

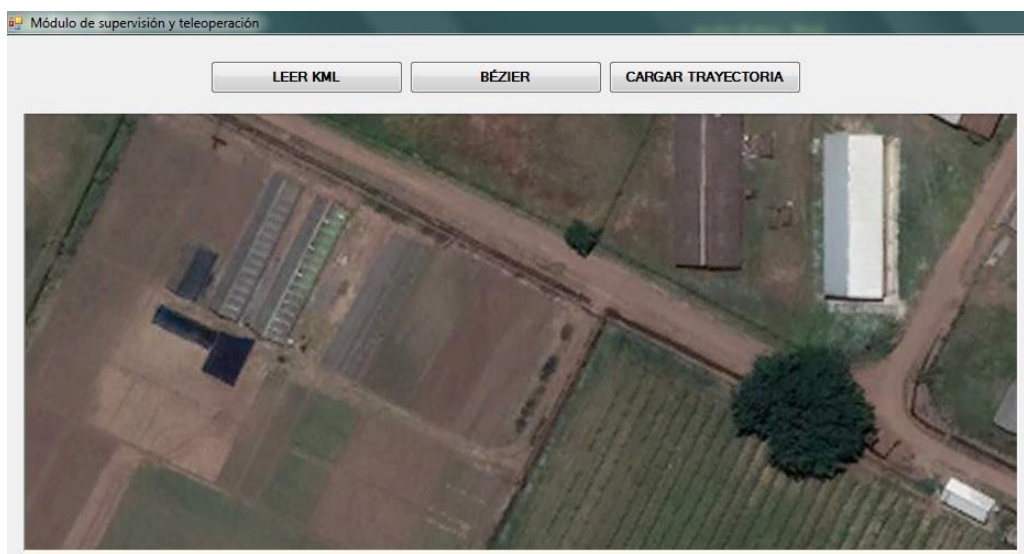


Figura 13. Ventana del módulo de supervisión que permite visualizar al robot dentro de la zona de trabajo mientras desarrolla la misión. Fuente propia.

Módulo de tele-operación. Este módulo se encarga de controlar remotamente en forma manual las acciones del robot (Figura 14). Cuenta con dos botones que permiten seleccionar entre el modo de operación automático y manual, siendo mutuamente excluyentes, es decir, presionar uno releva al otro y viceversa. Un joystick virtual permite dar dirección al robot al hacer clic con el mouse sobre la orientación que se desea comunicar al robot.

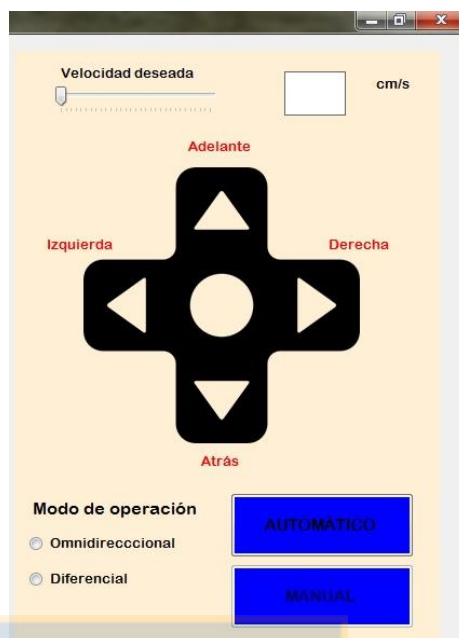


Figura 14. Apariencia del módulo de tele-operación. Detalle del Joystick que permite dirigir al robot. Un par de botones permiten seleccionar entre el modo de conducción automático y manual. Fuente propia.

Cuando se selecciona la opción de operación manual, la velocidad del robot es de $0,2 \text{ m s}^{-1}$, esto con el propósito de evitar accidentes debido a excesos de velocidad. En el modo automático, es el usuario quien define la velocidad de la trayectoria, en función de la tarea a desarrollar y de la cinética del robot.

Módulo de comunicación. Por último, transversal al módulo de supervisión y teleoperación, está el módulo de comunicación. En este módulo se implementó las tramas definidas para la comunicación de la ruta óptima al robot, la telemetría y la tele-operación.

Como se observa en la Figura 15, este módulo permite seleccionar el puerto de comunicación que se utilizará para transmitir y recibir información desde el robot. Permite además seleccionar la velocidad de transmisión de información, la que puede ser ajustada con valores desde los 9600bps hasta 115200bps.

The image shows a software interface window titled 'Comunicación'. Inside the window, there are two labels: 'Puertos com:' and 'Velocidad de comunicación:'. Below each label is a white rectangular box with a small downward-pointing arrow on the right side, indicating a dropdown menu. The window has a light yellow background and a thin border.

Figura 15. Módulo de comunicación, en el cual es posible seleccionar el puerto de comunicaciones (Puerto COM) a emplear, así como la velocidad de comunicación. Fuente propia.

CONCLUSIONES.

Los algoritmos implementados permiten generar rutas óptimas en entornos estructurados, a la vez que proveen de trayectorias suaves, útiles para robots móviles agrícolas. En particular le permite al robot Baco navegar de forma segura ya que:

- Se implementó algoritmos de planificación de misiones sobre cultivos hilerados e implementarlos en un software que sirve de interface para el usuario. Los algoritmos implementados permiten encontrar una ruta óptima si la hay y proveen de una trayectoria suave, lo que garantiza que el robot pueda seguirla.
- Se adquirió remotamente información del estado del robot: esto es velocidad y orientación de las ruedas, consumo de energía, voltaje en las baterías y coordenadas UTM de la posición del robot, lo que permite supervisar su estado. Además, permite la visualización de la posición a través de mapas de Google Maps incrustados como parte del software.
- El software desarrollado permitió controlar remotamente en forma manual y segura las acciones del robot a través de un simulador de manejo.

LITERATURA CITADA.

1. Bak, T., H. Jakobsen. 2004. Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection. *Biosystems Eng.* 87(2):125-136.
2. Bakker, T., K. van Asselt, J. Bontsema, J. Müller and G. van Straten. 2010. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *Journal of Terramechanics* 47(2): 63-73.
3. Choj, J.-W., R. Curry and G. Elkain. 2009. Path planning based on Bézier curve for autonomous ground vehicles. pp: 158-166. In: *Advances in electrical and electronics engineering. IAENG special edition of the world congress on engineering and computer Science 2008.* IEEE Computer Society. Los Alamitos, USA.
4. Hart, P.E., N.J. Nilsson and B. Raphael. 1968. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost path. *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.* 4(2): 100-107.
5. Khalil, W., E. Dombre. 2002. *Modeling, identification & control of robots.* Hermes Penton. London, UK.
6. Muir, P.F., C.P. Neuman. 1987. Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot. pp: 1772-1778. In: *Proceedings of 1987 IEEE international conference on robotics and automation. Volume 3. March 31-April 3, 1987.* Computer Society Press of the IEEE. Washington D.C., USA
7. Ollero, A. 2001a. Morfología de los robots. pp: 16-38. En: *Robótica manipuladores y robots móviles.* Marcombo. Barcelona, España.

8. Ollero, A. 2001b. Robótica manipuladores y robots móviles. Marcombo. Barcelona, España.
9. Siegwart, R., I. R. Nourbakhsh. 2004. Locomotion. pp: 13-46. In: Introduction to autonomous mobile robots. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, USA.

