

UNRN

Universidad Nacional
de **Río Negro**

Proyecto Final Integrador Ingeniería Electrónica

**Implementación de controlador entre
dispositivos ISOBUS y cuerpos de siembra**

Emilio Bascary

Director Ing. Santiago Abbate

Agosto 2024

Resumen

En este proyecto se trabajó en el desarrollo de una unidad de control electrónico para la automatización de una sembradora agrícola para trabajos de siembra directa, enfocado en la utilización de estándares que provean interoperabilidad y compatibilidad entre equipos agrícolas de distintos fabricantes.

Para ello, se trabajó en la implementación de un sistema que permitiera la gestión centralizada del proceso de siembra desde una consola ubicada en la cabina del tractor de la sembradora, simplificando las operaciones y asegurando un manejo eficiente.

El dispositivo desarrollado permite realizar ajustes personalizados en la distribución de las semillas, adaptándose a las necesidades del usuario. La validación del sistema se realizó en condiciones controladas de laboratorio, utilizando simuladores que reprodujeron los distintos componentes del sistema, garantizando un rendimiento adecuado antes de sus pruebas en campo, por parte del cliente final, un fabricante de equipos agrícolas.

Índice de contenido

Introducción	pág. 8
Motivación	pág. 8
Estado del arte: tecnologías	pág. 9
ISOBUS	pág. 9
Evaluación inicial del proyecto	pág. 11
Objetivos	pág. 13
Desarrollo del proyecto	pág. 14
Desarrollo de un Prototipo Inicial	pág. 14
Evaluación del Prototipo Inicial y Desarrollo del Prototipo Final	pág. 14
Características de los nodos	pág. 15
Análisis de requerimientos	pág. 16
Comunicación ISOBUS	pág. 17
Control de surcos	pág. 17
Interfaz de Usuario	pág. 17
Control de mapa de siembra y documentación	pág. 17
Prototipo Inicial	pág. 17
Elección de hardware	pág. 18
Microcontrolador seleccionado	pág. 19
Desarrollo	pág. 20
Terminal Virtual	pág. 21
Controlador de Tareas	pág. 22
Módulo de comunicación	pág. 22
Prototipo Final	pág. 28
Especificaciones del prototipo final	pág. 29
Terminal Virtual	pág. 29

Configuración	pág. 29
Configuraciones Generales	pág. 29
Configuraciones de cada cuerpo de siembra	pág. 30
Configuraciones específicas de siembra	pág. 31
Calibración	pág. 32
Trabajo	pág. 33
Estructura del software implementado	pág. 34
Modos de funcionamiento	pág. 34
Modo manual	pág. 35
Modo automático	pág. 36
Lectura de velocidad lineal	pág. 36
Lectura de velocidad GPS	pág. 37
Lectura de velocidad de Encoder	pág. 37
Procedimiento de conexión de nodos de siembra	pág. 38
Calibración	pág. 39
Desarrollo de pantallas	pág. 41
Pantalla de Configuración	pág. 41
Pantalla de Calibración	pág. 43
Pantalla de Trabajo	pág. 47
Funcionamiento con simuladores y 5 cuerpos de siembra	pág. 48
Funcionalidad clave del Controlador de Tareas	pág. 51
Conclusiones	pág. 53
Trabajo a futuro	pág. 55
Apéndice	pág. 58
Protocolo de comunicación.....	pág. 58

Bibliografía y referencias pág. 66

Índice de figuras

Figura 1: Interior de tractor con Monitor ISOBUS	pág. 10
Figura 2: Diagrama general de los distintos bloques del sistema	pág. 12
Figura 3: Ubicación de los bloques principales en el sistema	pág. 13
Figura 4: Monitor John Deere GreenStar 2630, compatible ISOBUS	pág. 14
Figura 5: Esquema de conexión entre ECU y múltiples nodos	pág. 16
Figura 6: Diagrama general de hardware y conexiones necesarias	pág. 18
Figura 7: Hardware y conexiones utilizadas para el prototipo	pág. 19
Figura 8: Software utilizado para el diseño de la Terminal Virtual	pág. 21
Figura 9: Terminal Virtual desarrollada para el prototipo inicial	pág. 23
Figura 10: Hardware utilizado para el prototipo inicial	pág. 25
Figura 11: Simulador de Controlador de Tareas con mapa de siembra	pág. 26
Figura 12: Simulador de Controlador de Tareas con zona previamente procesada ...	pág. 27
Figura 14: Diagrama general de la arquitectura propuesta del prototipo final	pág. 29
Figura 15: Diagrama de casos de uso del menú configuración general	pág. 30
Figura 16: Diagrama de casos de uso del menú configuración de surcos	pág. 31
Figura 17: Diagrama de casos de uso del menú configuración de siembra	pág. 32
Figura 18: Diagrama de casos de uso del menú calibración	pág. 39
Figura 19: Diagrama de casos de uso del menú trabajo	pág. 40
Figura 20: Diagrama de estados de los distintos modos de trabajo	pág. 42
Figura 21: Diagrama de estados de las distintas fuentes de velocidad	pág. 43
Figura 22: Diagrama de secuencia de inicialización de nodos	pág. 45
Figura 23: Diagrama de estados del proceso de calibración	pág. 46
Figura 24: Pantalla de configuración en el simulador	pág. 48
Figura 25: Pantalla de configuración de surcos en el simulador	pág. 49
Figura 26: Pantalla de configuración de alarmas en el simulador	pág. 50
Figura 27: Pantalla general de calibración en el simulador	pág. 52

Figura 28: Pantalla de calibración de grano grueso en el simulador	pág. 53
Figura 29: Pantalla de reporte de calibración de grano grueso en el simulador	pág. 54
Figura 30: Pantalla de Trabajo en el simulador	pág. 56
Figura 31: Simulador de Controlador de Tareas con 5 surcos en funcionamiento	pág. 57
Figura 32: Simulador de Controlador de Tareas con 5 surcos en distintas condiciones	pág. 58

Índice de tablas

Tabla 1: Métodos implementados en el protocolo de comunicación entre ECU y Nodo.

Indicando nombre y la fuente del mensaje pág. 60

Siglas y acrónimos

ECU Unidad de Control Electrónica (en inglés, Electronic Control Unit)

TECU Unidad de Control Electrónica del Tractor (en inglés, Tractor Electronic Control Unit)

VT Terminal Virtual (en inglés, Virtual Terminal)

TC Controlador de Tareas (en inglés, Task Controller)

UT Terminal Universal (en inglés, Universal Terminal)

ID Identificador (en inglés, Identifier)

1 Introducción

Este proyecto se desarrolló como parte de una iniciativa dentro de la empresa Emtech S.A., diseñada como solución para un cliente, fabricante de máquinas sembradoras. Se centra en el diseño e implementación de un sistema de control basado en el estándar ISOBUS para una sembradora de discos. La elección de este tipo de máquina agrícola responde a la disponibilidad, por parte del cliente final, de los cuerpos de siembra y de sus nodos controladores, lo que permite una integración eficiente con el protocolo ISOBUS.

El cliente principal de este proyecto es un fabricante especializado el cual ha definido en gran medida los requerimientos técnicos y funcionales del sistema. El diseño del dispositivo se basa en las características distintivas de las sembradoras de este fabricante, asegurando que el sistema cumpla con las necesidades específicas de sus operaciones y productos.

Motivación

La motivación de llevar a cabo este proyecto surge de la necesidad por parte del cliente final de crear máquinas que hagan más efectiva la agricultura, mejorando la precisión de la siembra, reduciendo el desperdicio de semillas y optimizando recursos en general. A través del control automático de los surcos donde se colocan las semillas y/o se aplican fertilizantes, se disminuye la carga del operador, permitiéndole concentrarse en otras tareas durante la siembra.

Además, un aspecto importante es mantener un registro constante de la siembra en un formato estándar, como es ISOBUS, que facilita la mejora continua en los procesos de siembra. Este registro de parámetros estadísticos permite realizar un análisis detallado a lo largo del tiempo, lo que contribuye a la toma de decisiones informadas para incrementar la productividad y sostenibilidad.

La sembradora de discos seleccionada como base para este proyecto es ideal para garantizar una siembra precisa y uniforme, adaptándose a diversas condiciones de campo. Este tipo de máquina agrícola es ampliamente utilizada en el sector agrícola debido a su capacidad para trabajar eficientemente en diferentes tipos de suelo y garantizar una profundidad constante en la colocación de semillas.

Estado del arte: tecnologías

ISOBUS

ISOBUS es un protocolo de comunicación internacional estandarizado que permite que diferentes equipos agrícolas se comuniquen entre sí a través de un único lenguaje común. El término ISOBUS se refiere a la norma ISO 11783, titulada "Tractores y maquinaria para la agricultura y la silvicultura - Redes de datos de comunicaciones y control en serie" [1]. Esta norma surgió a mediados de los años 90 como respuesta a la necesidad de

estandarizar y centralizar el control y la interfaz usuario-máquina en sistemas formados por tractores y equipos de trabajo, como sembradoras, cosechadoras y pulverizadoras, entre otros.

Un sistema ISOBUS permite al operador conectar y controlar diferentes equipos agrícolas mediante un único terminal gráfico, denominado Terminal Universal (UT), para gestionar todas las máquinas agrícolas ISOBUS compatibles, independientemente del fabricante. Esto elimina la necesidad de un terminal diferente para cada tipo de maquinaria agrícola. Este concepto de "Plug and Play" permite que, con solo conectar el equipo, se pueda comenzar a trabajar de manera eficiente, sin la necesidad de configuraciones adicionales ni problemas de compatibilidad [2].



Figura 1: Izquierda: Interior de tractor con Monitor ISOBUS. Derecha: Interior de tractor con múltiples pantallas.

El desarrollo técnico de ISOBUS comenzó en 1991 y la norma fue introducida en 2001. En 2008, la Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) fue creada para apoyar la implementación global de ISOBUS, promoviendo su adopción entre fabricantes y usuarios. La AEF [3] desempeña un papel crucial en la normalización y regulación del uso de ISOBUS, asegurando su interoperabilidad y soporte continuo. Entre las ventajas clave de ISOBUS se encuentra su capacidad para documentar diversos procesos agrícolas de manera estándar, incluyendo un protocolo para el intercambio de información con los sistemas informáticos de las explotaciones agrarias. Esto permite actividades de agricultura de precisión, como la distribución variable de insumos (fertilizantes, productos químicos) en función de la ubicación del implemento en el campo.

En resumen, ISOBUS no solo mejora la eficiencia y reduce costos, sino que también optimiza el uso de recursos y promueve la sostenibilidad en las actividades agrícolas.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático de los componentes involucrados en el proyecto. En la parte superior se destaca la interfaz gráfica o terminal universal, en este caso dentro del tractor, que permite la interacción con el dispositivo desarrollado a través del protocolo de comunicación ISOBUS. Dentro de este estándar, la Terminal Virtual actúa como una interfaz de usuario que centraliza el control de distintos equipos agrícolas,

mientras que el Controlador de Tareas gestiona la automatización de procesos, como la aplicación del producto a sembrar basado en mapas de prescripción.

En el otro extremo se observan los cuerpos de siembra controlados individualmente por una unidad de control (ECU), que se comunican mediante un protocolo propietario utilizando la capa física BUS CAN.

El componente principal de este proyecto es, en efecto, este dispositivo de control, o ECU en la imagen, que sirva de interfaz entre una máquina agrícola, en este caso una sembradora, terminales universales y otros dispositivos ISOBUS de distintas marcas. Esto permite que una misma máquina agrícola se pueda controlar desde múltiples dispositivos que cumplan la norma ISOBUS, por lo que se podrá conectar a tractores de distintos fabricantes que también trabajen bajo este protocolo.

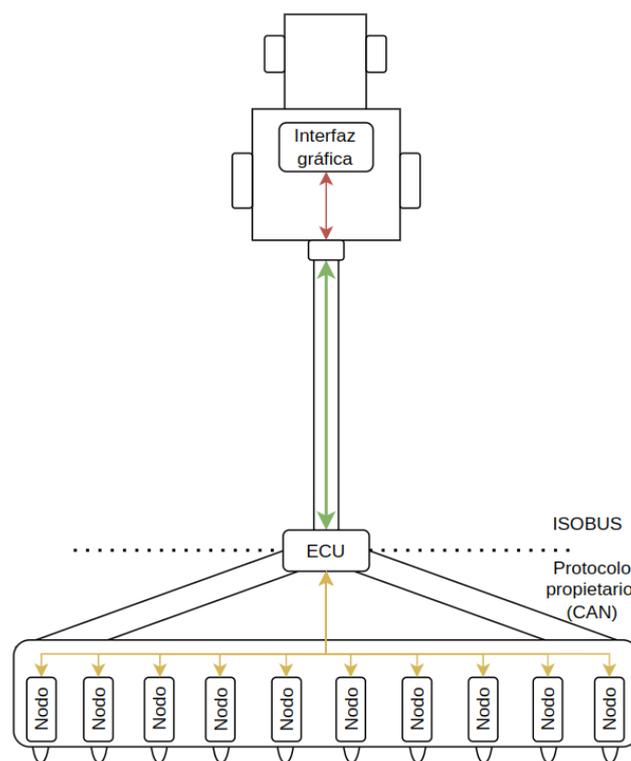


Figura 2: Diagrama general de los distintos bloques del sistema.

La figura 3 muestra la ubicación física en un sistema compuesto por un tractor y un equipo de siembra vinculado, de los tres componentes principales del sistema, la terminal dentro del tractor, la ECU de la sembradora (desarrollo objetivo de este proyecto final), y los nodos de cuerpo de siembra.

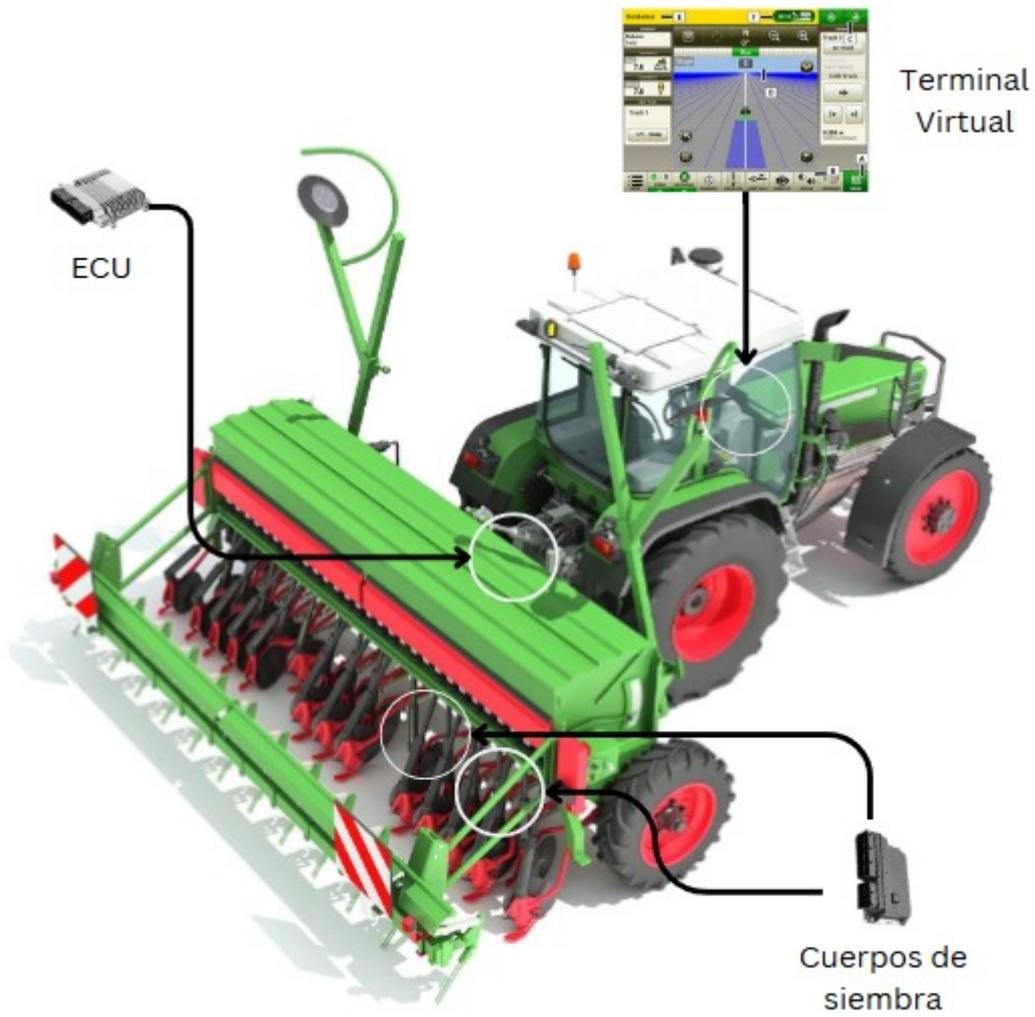


Figura 3: Ubicación de los bloques principales en el sistema.

Evaluación inicial del proyecto

Como primera tarea en el desarrollo del dispositivo, se llevó a cabo una evaluación en conjunto con el cliente, el desarrollador de la parte mecánica de la sembradora. Esta etapa tuvo como objetivo realizar un análisis exhaustivo de las necesidades y los requisitos funcionales del dispositivo, permitiendo identificar de manera clara qué elementos serían necesarios adquirir y qué recursos podrían resultar indispensables para su implementación.

Esto asegura que el diseño del sistema no solo cumpla con los estándares ISOBUS, sino que también esté alineado con las expectativas y demandas específicas del cliente.

Estructura del desarrollo

En el desarrollo del proyecto participaron diversas áreas y equipos, cada uno encargado de diferentes componentes del sistema. A lo largo del documento se mencionan otras partes del proyecto que son relevantes para el desarrollo del mismo.

Una vez realizada la evaluación inicial, el proyecto se organizó en dos equipos de trabajo para facilitar la implementación de los diferentes componentes del sistema.

- **Aratom:** Empresa encargada del desarrollo de los nodos en general, incluyendo su diseño, programación y pruebas.
- **Emtech:** Empresa dedicada al diseño y desarrollo de la ECU, que constituye el dispositivo central de este proyecto final.

A lo largo del proyecto se menciona sobre la coordinación con el equipo encargado del desarrollo de los nodos. Esta división permitió un enfoque especializado en cada componente del sistema ISOBUS, asegurando un progreso eficiente y coordinado entre los equipos. En el caso de la ECU, el desarrollo se orientó hacia la integración de las funcionalidades definidas durante la evaluación inicial y las especificaciones establecidas en colaboración con el cliente.



Figura 4: Monitor John Deere GreenStar 2630, compatible ISOBUS.

Las subsecciones siguientes detallan los objetivos del proyecto, que surgieron como resultado de la evaluación inicial en conjunto con el cliente del sistema y los socios en el desarrollo.

Objetivos

Objetivo General:

Diseñar e implementar un sistema de control para una sembradora electrónica que cumpla con los estándares ISOBUS, optimizando los procesos de siembra y reduciendo la carga del operador.

Objetivos Específicos:

El objetivo de este proyecto contempló la implementación de un dispositivo electrónico (ECU) que se monta sobre una sembradora permitiendo el control independiente de cada uno de sus cuerpos de siembra, los encargados de depositar las semillas en el suelo. A su vez, este dispositivo debe poder ser conectado a cualquier tractor que implemente el estándar ISOBUS, un protocolo que permite gestionar la comunicación entre tractores, software y equipos de los principales fabricantes agrícolas, permitiendo el intercambio de datos e información con un lenguaje universal a través de una única consola de control en la cabina del tractor.

El dispositivo desarrollado controla cuerpos de siembra que se comunican a través de CAN-BUS y permiten recibir comandos para escribir valores como la velocidad de motor, densidad de siembra, y leer parámetros como la estadística de siembra y reporte de fallas.

El dispositivo permite conectarse a dos de los servicios que ofrece una consola con estándar ISOBUS dentro de la cabina del tractor, la Terminal Virtual y el Controlador de Tareas. La Terminal Virtual le ofrece al usuario una interfaz visual del dispositivo para tener acceso a sus características. A través de esta terminal se realiza una calibración de cada cuerpo de siembra, se configura la sembradora y la disposición de los cuerpos de siembra dentro de ésta, se controla el proceso de siembra y visualizan distintos parámetros de estadística. El Controlador de Tareas permite el control de distintos procesos, como escritura y lectura de parámetros de siembra, control de corte por surcos de acuerdo a un mapa de siembra precargado. El mapa de siembra permite documentar en un formato estándar el proceso de siembra realizado para su posterior procesamiento.

A través de estos dos servicios, el dispositivo permite al usuario realizar una siembra de forma manual, es decir, la densidad de siembra es modificada por el usuario durante el mismo proceso de siembra, o de forma automática, en donde la densidad se recibe desde el Controlador de Tareas de la consola, a través de un mapa de densidades generadas previamente en un software dedicado.

Al tener un control de cuerpos de siembra electrónicos, se puede realizar una calibración de los surcos de manera independiente y a la densidad de siembra que el usuario desee.

2. Desarrollo del proyecto

Desarrollo de un Prototipo Inicial

El primer paso consistió en la creación de un prototipo inicial, diseñado con un enfoque en la simplicidad de implementación. Este prototipo cumplió la función de prueba de concepto, demostrando la viabilidad técnica y funcional del dispositivo ISOBUS, además de servir como una versión preliminar presentada al cliente. Durante esta etapa, se validaron las funcionalidades principales del dispositivo, asegurando que estas cumplieran con los requisitos básicos definidos en la evaluación inicial.

Evaluación del Prototipo Inicial y Desarrollo del Prototipo Final

Después de la presentación del prototipo inicial al cliente, se llevó a cabo una fase de evaluación y análisis detallado. En este proceso, el cliente proporcionó retroalimentación basada en el funcionamiento observado, lo que permitió realizar los ajustes necesarios para optimizar el diseño y corregir posibles fallos. A partir de este análisis, se inició el desarrollo del prototipo final, el cual integró todas las mejoras y características definitivas para garantizar que el dispositivo cumpliera con los estándares de calidad y funcionalidad requeridos.

Este enfoque por etapas permitió avanzar de manera controlada y metódica, asegurando que cada fase del desarrollo cuente con las validaciones necesarias para garantizar el éxito del proyecto.

Para el desarrollo se debe mencionar el hardware y software con el que se trabajó de forma complementaria. De forma general se destacan componentes como un Monitor para la comunicación y visualización del cliente de la Terminal Virtual desarrollado en la ECU, y que sirve como interfaz gráfica a la sembradora. El monitor utilizado es el GreenStar 2630 de la marca John Deere como el de la figura 4, que presenta una pantalla táctil que permite controlar una variedad de aplicaciones, y máquinas.

Por otro lado, también es importante mencionar que la librería oficial ISOBUS no es de desarrollo propio ni de Emtech, sino que la empresa adquirió la librería de este estándar con algunos ejecutables de simuladores que fueron útiles para el desarrollo de este proyecto. E

El otro de los componentes del sistema, provisto por la empresa Aratom, socia en el desarrollo, son los nodos controladores de los cuerpos de siembra. A continuación se detallan sus características en conjunto con el protocolo de comunicación entre estos y la ECU desarrollada.

Características de los nodos

El nodo del cuerpo de siembra es el encargado de hacer el procesamiento de los mensajes recibidos por la ECU y de controlar y monitorear el proceso de siembra. En el mercado existen distintos tipos de nodos, dependiendo del tipo de tarea a realizar sobre el surco en

la tierra, por ejemplo pueden ser cuerpos de siembra, fertilizante o pastura como los más comunes, aunque para este proyecto nos basaremos en uno que solo se encarga de la tarea de siembra. A modo de visualización general del tipo de nodo utilizado, la figura 5 muestra los componentes principales de este, en su vinculación con el resto del sistema en una sembradora.

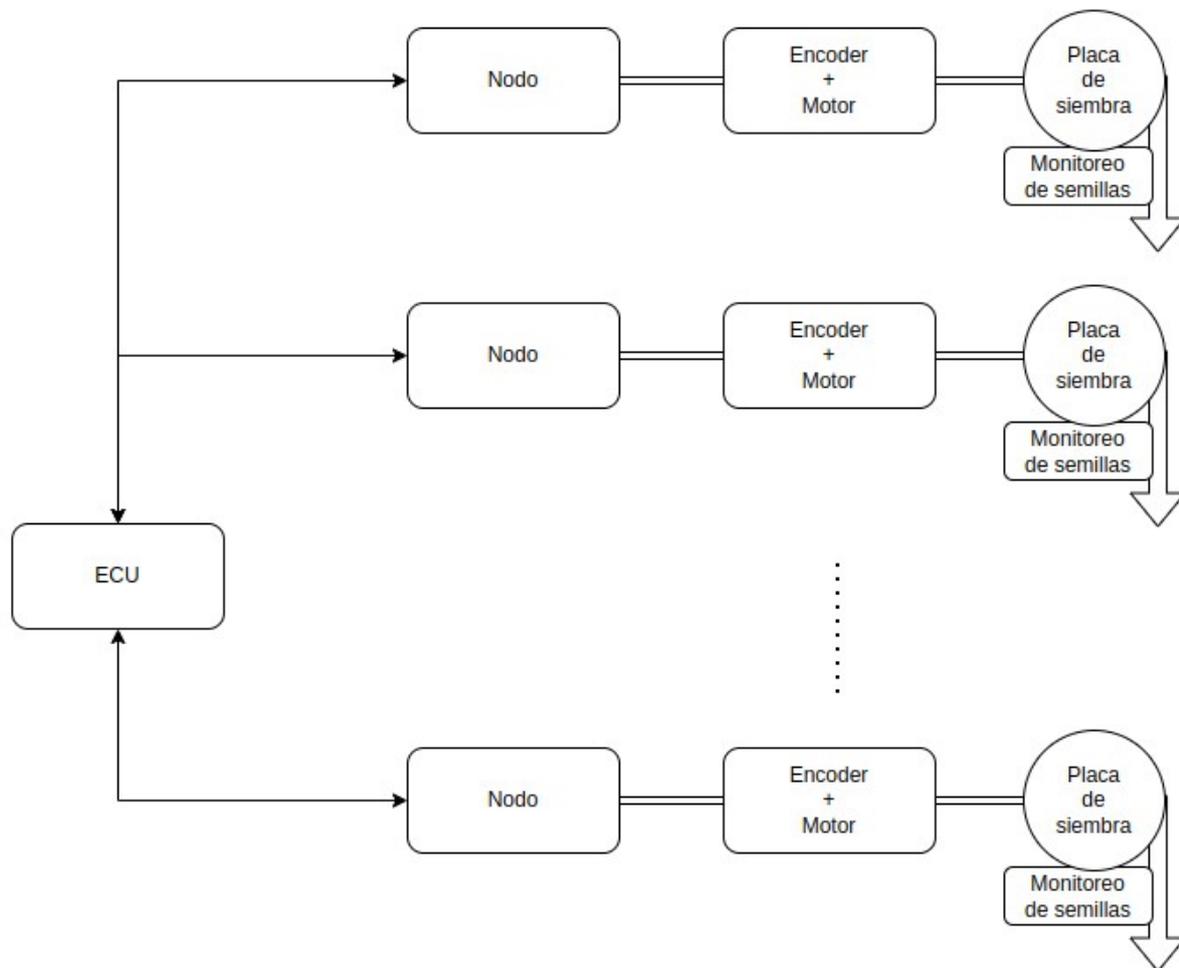


Figura 5: Esquema de conexión entre ECU y múltiples nodos.

En el caso de un cuerpo de siembra es necesario ajustar, por ejemplo, la velocidad a la que giran sus discos, que se traduce en la densidad de semillas efectivamente colocadas.

Cada nodo intercambia mensajes con la ECU, con valores de configuración en función del tipo de nodo, y mensajes de operación que le indican si debe sembrar o no, el estado de la siembra, la densidad de semillas por metro, entre otros.

A su vez, cada nodo puede enviar reportes de funcionamiento hacia la ECU.

3. Análisis de requerimientos

Los requerimientos pueden dividirse en las siguiente categorías:

Comunicación ISOBUS:

- La ECU debe poder enviar y recibir mensajes ISOBUS a través de la red CAN que la conecta con la Terminal Universal.
- La ECU debe ser compatible con otros dispositivos agrícolas que cumplan el estándar.

Control de surcos:

La ECU debe actuar de interfaz entre la Terminal Universal y los nodos de cada cuerpo de siembra.

Cada surco debe poder controlarse independientemente en dos modos de funcionamiento, calibración y trabajo de siembra.

La ECU debe establecer comunicación con los nodos mediante el protocolo definido en el punto 1 del apéndice de este documento.

Interfaz de Usuario:

Se debe proveer una interfaz gráfica sobre una terminal universal de tractor para que el operador pueda tener un acceso sobre las funcionalidades de la ECU sobre la sembradora.

Control de mapa de siembra y documentación:

El sistema deberá tener una interacción con el Controlador de Tareas presente en la Terminal Universal para poder ejecutar tareas de siembra y generar reportes de siembra con datos estadísticos.

4. Prototipo Inicial

Como primer diseño de firmware que involucre los diferentes módulos, y permita validar las interfaces entre distintos subsistemas se llevó a cabo un prototipo inicial, que tenía como objetivos:

- Desarrollar un cliente de Terminal Virtual y validar su funcionamiento con el simulador correspondiente, permitiendo una interacción bidireccional con el usuario. Esto permitiría evaluar cómo se observan los objetos en la Terminal Virtual, la interacción con distintos objetos y tiempos de respuesta entre la interacción de objetos y su consecuencia en el cuerpo de siembra.
- Desarrollar un cliente de Controlador de Tareas a ejecutar en el simulador, permitiendo un control sobre el cuerpo de siembra de acuerdo al funcionamiento de control por surcos.
- Desarrollar un módulo que se encargue de la comunicación entre ECU y cuerpo de siembra, en ambas direcciones, que permitirá tener un mejor entendimiento del protocolo de comunicación.

Este prototipo inicial contó con un cliente de Terminal Virtual y un cliente de Controlador de Tareas visualizados y controlados por simuladores que corren en una PC a la que se conectó un conversor CAN-Serie. Mediante las interfaces desarrolladas se permite al usuario controlar el funcionamiento del motor del nodo del cuerpo de siembra ajustando distintos parámetros:

- Velocidad lineal a la que está moviéndose la sembradora. El usuario puede visualizar la velocidad lineal actual, dentro de un rango definido, permitiendo incrementar y decrementar este valor a través de dos botones distintos.
- Densidad lineal de siembra a la que debe sembrar el cuerpo de siembra. Al igual que con la velocidad lineal, el usuario puede visualizar la densidad lineal, dentro de un rango definido, permitiendo incrementar y decrementar este valor a través de dos botones distintos.
- Posición del sensor de clavado de la sembradora. Este parámetro varía entre dos estados, máquina clavada y máquina desclavada, que permite a la ECU saber si los surcos están físicamente dentro de la superficie a sembrar.

Esta primera funcionalidad definida sobre el prototipo permite el control del cuerpo de siembra, pero también sirvió de herramienta para validar la recepción de mensajes del nodo en la ECU. Como primera interacción, el nodo comunica su ingreso a la red CAN y luego el usuario podrá ajustar los parámetros mencionados previamente observando el comportamiento que genera cada uno en el cuerpo de siembra.

Como este prototipo no se encontraba conectado a un cuerpo de siembra, el sensado de semillas debió realizarse mediante datos simulados provenientes del nodo el cuerpo de siembra. En este caso el equipo a cargo del desarrollo del nodo se encargó de la generación de estos datos simulados, que eran enviados periódicamente a la red CAN emulando la presencia de un sensor de semillas. Estos valores podrían ser visualizados en la Terminal Virtual.

Elección de hardware

Con la definición de los requerimientos para llevar a cabo este proyecto, se procedió a la selección de los elementos correspondientes con las siguientes consideraciones:

- La ECU debe poder contar con las memorias flash y RAM adecuadas para albergar la librería con el stack de ISOBUS y ofrecer un rendimiento óptimo para una aplicación de estas características.
- La ECU debe poder comunicarse bidireccionalmente con la PC, donde se ejecutan los simuladores de los servicios ISOBUS.
- Para la comunicación con los nodos, la ECU debe poder comunicarse a través de CAN BUS.

Cómo se aprecia en la figura 6, se presenta el caso en el que la ECU está conectada a múltiples cuerpos de siembra. El prototipo inicial solamente utiliza uno de estos, pero se tiene en cuenta en el diagrama el caso de múltiples cuerpos de siembra que será útil también para el caso del prototipo final.

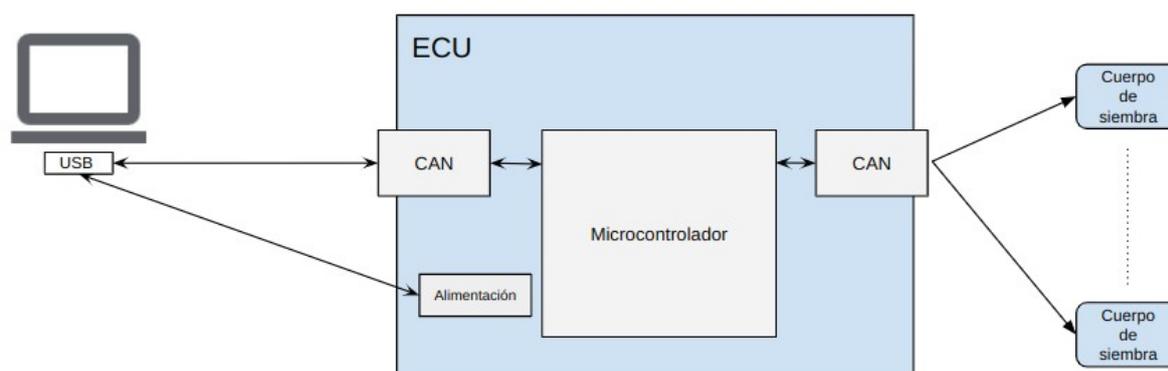


Figura 6: Diagrama general de hardware y conexiones necesarias.

Microcontrolador seleccionado

Para el desarrollo del prototipo inicial de la ECU se seleccionó un kit de desarrollo de la marca ST, NUCLEO-F767zi [4], que posee las siguientes características importantes para llevar a cabo el dispositivo:

- Procesador Arm® Cortex®-M7 32-bit con una frecuencia máxima de 216 MHz.
- 3 controladores CAN.
- 4 controladores UART.
- 4 controladores I2C.
- 6 controladores SPI.
- 2 MB de memoria flash y 512 KB de memoria RAM.

Los controladores CAN se utilizan, uno para la comunicación con los simuladores de los servicios ISOBUS y otro para la comunicación con los nodos de siembra. Los demás controladores pueden ser de utilidad para la comunicación con algún dispositivo que lo requiera, o incluso para realizar monitoreo/análisis del código de aplicación del microcontrolador.

Como interfaz CAN-Serie se utilizó un convertor de la marca PEAK-SYSTEM [5], un adaptador que permite una conexión simple a una red CAN. Para diagnóstico y análisis del tráfico de mensajes en la red conectada a este convertor, se utilizan drivers y softwares propietarios.

La conexión entre los distintos simuladores ISOBUS y el microcontrolador conectado al convertor CAN-USB se hace a través de un ejecutable provisto por las herramientas de ISOBUS adquiridas por Emtech, que permite en este caso establecer un único canal de comunicación entre todos los dispositivos conectados a la red.

El microcontrolador posee controladores CAN, que se comunican a través de señales lógicas, y no diferenciales, como lo hace una red CAN a través de dos líneas, CAN_H y CAN_L. Para ellos es necesario una interfaz entre los controladores CAN y ambos buses de comunicación CAN-BUS. Este elemento de hardware es un transceptor [6] que tiene como finalidad convertir señales lógicas en señales diferenciales en ambas direcciones. Se eligió para esta adaptación un módulo comercial que se encarga de resolverlo.

Estas elecciones de hardware, resultan en el siguiente prototipo inicial con el que se puede comenzar la etapa de desarrollo del código de aplicación.

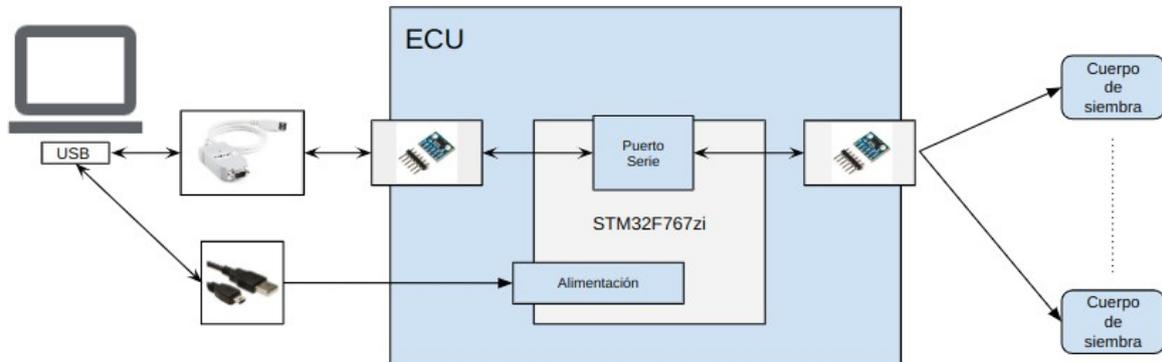


Figura 7: Hardware y conexiones utilizadas para el prototipo.

Desarrollo

Para el diseño y construcción del prototipo inicial, se realizó un análisis de las funcionalidades proporcionadas por la librería ISOBUS [7]. Este análisis incluyó el estudio detallado de los métodos disponibles, los tipos de datos que maneja, y los requisitos necesarios para su implementación. Este proceso permitió comprender en profundidad las capacidades de la librería, así como las limitaciones y las oportunidades de personalización que ofrece.

Inicialmente, se examinaron los métodos disponibles en la librería para asegurar que fueran adecuados para los objetivos del prototipo. Esto implicó la identificación de las funciones clave, como el manejo de mensajes CAN, la configuración de objetos ISOBUS compatibles, y la integración con el Terminal Virtual.

Se realizó también un análisis de los requisitos necesarios para implementar la librería en el entorno de desarrollo embebido, utilizando el lenguaje C. Esto incluyó la evaluación de dependencias de software, configuraciones de hardware, y consideraciones específicas del bus CAN, como velocidades de transmisión y filtrado de mensajes. Este paso fue crucial para garantizar una implementación eficiente y alineada con los estándares establecidos por la norma.

El estudio detallado de la librería permitió identificar y aprovechar sus herramientas para optimizar el prototipo, como la capacidad de configurar mensajes de control específicos para los implementos agrícolas conectados, el soporte para la generación de tareas a través del Controlador de Tareas.

Este enfoque no solo facilitó la creación de un prototipo funcional, sino que también proporcionó una base sólida para el desarrollo del prototipo final o futuras implementaciones. El entendimiento obtenido de la librería ISOBUS fue esencial para garantizar la alineación del prototipo con los estándares de la industria, asegurando su escalabilidad y su capacidad de adaptarse a diferentes configuraciones y necesidades.

Terminal Virtual

El diseño visual de las pantallas se realizó a través de un software que también provee la misma empresa que provee la librería ISOBUS. Este se encarga solamente de facilitar el diseño visual, pero no agrega ninguna lógica del funcionamiento de la misma, y además se encarga de proveer elementos visuales que cumplan con la norma. La figura 8 muestra el software mencionado para el diseño visual, VT Designer, con la pantalla diseñada para el prototipo inicial que se desarrolla a continuación

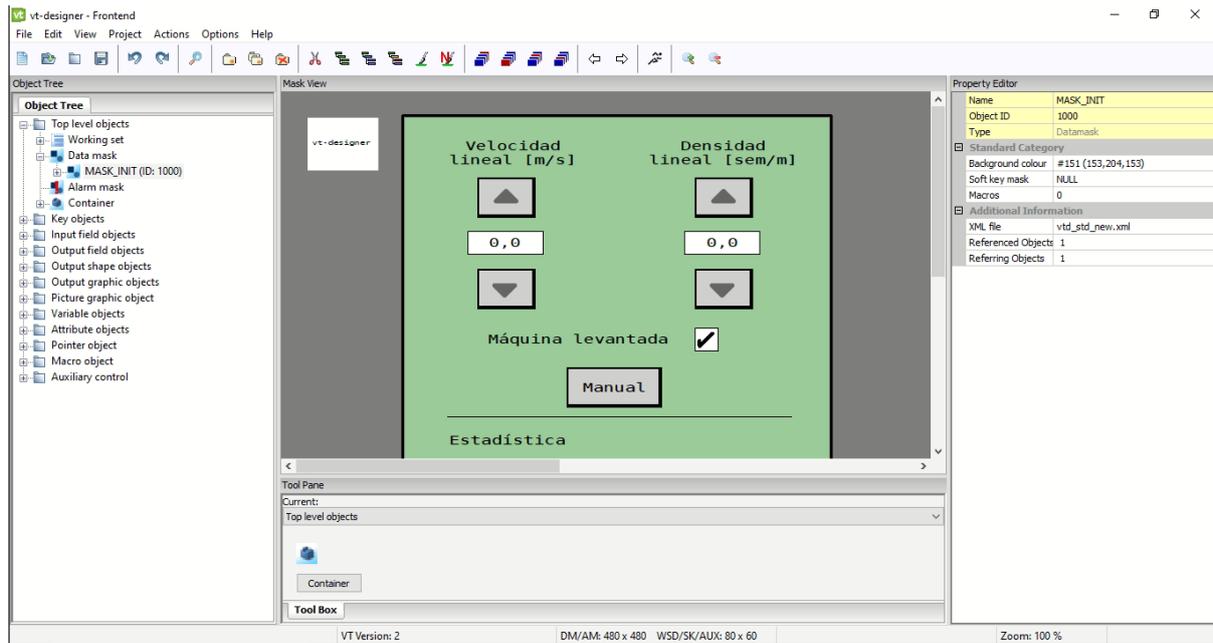


Figura 8: software utilizado para el diseño de la Terminal Virtual.

Se puede dividir en el desarrollo de la interfaz visual que permite la interacción del usuario con la ECU, y en la lógica que permite la interacción con el servidor, en este caso, se observan los resultados en el simulador de Terminal Virtual.

La interfaz visual se desarrolla en una aplicación específica para esta tarea, incluida en el mismo paquete que viene con los simuladores, y que permite crear pantallas con objetos que cumple la norma ISOBUS respecto a estilos, colores, tamaños, proporciones, tipos de letra. El diseño es puramente visual y la lógica se desarrolla posteriormente en la ECU.

Controlador de Tareas

Uno de los clientes ISOBUS de la ECU es el Controlador de Tareas (Task Controller), que se encarga del procesamiento y control de los parámetros específicos de la tarea de siembra, como la densidad objetivo y el corte por surco específico de cada posición de la sembradora en el mapa de siembra.

El servidor del Controlador de Tareas, que generalmente se encuentra físicamente junto a la Terminal Virtual, realiza un procesamiento de parámetros específicos de un mapa de siembra. Este mapa es una representación espacial de distintos valores de densidad objetivos dentro de una área a sembrar, es decir, es un tipo de archivo generado con un software específico para indicar al Controlador de Tareas los valores de densidad objetivo en distintos puntos geográficos. Además permite tener un registro en tiempo real del estado de cada surco para poder tener un control del corte por surco de la sembradora.

Si en la red ISOBUS está conectado el servidor de este módulo, el cliente implementado en la ECU hará un llamado periódicamente hasta que el servidor haga el handshake inicial. El servidor indica a los posibles clientes en la red sus características, como son la cantidad máxima de secciones que puede controlar, si posee la posibilidad de hacer un procesamiento del mapa de siembra y datos físicos de la sembradora si es que existía una configuración previa cargada en la Terminal Virtual.

Módulo de comunicación

Para este prototipo inicial se desarrolló un módulo encargado de enviar y procesar mensajes con los cuerpos de siembra, pero que fué validado con un único cuerpo, a diferencia de una sembradora completa, que puede contar con hasta 64 cuerpos. Éste módulo se encarga de:

- Configurar el nodo como un cuerpo de siembra con motor y sensor de semillas cada vez que lo solicita.
- Enviar comandos de inicio y detención de los cuerpos de siembra con los valores de velocidad lineal y densidad objetivo cada vez que el usuario haya modificado el valor de velocidad lineal o de densidad lineal en la Terminal Virtual.
- Enviar comandos de inicio y detención de los cuerpos de siembra con los valores de velocidad lineal y densidad objetivo cada vez que el usuario haya modificado el valor del estado del sensor de clavado.
- Procesar parámetros estadísticos cada vez que lleguen del cuerpo de siembra, actualizando el campo correspondiente a cada uno en la Terminal Virtual.

Visualmente, el cliente de la Terminal Virtual es sencillo. Como se aprecia en la figura 9, consta de una sola pantalla para controlar el único cuerpo de siembra, y a su vez variar un solo parámetro del Controlador de Tareas para tener un procesamiento a través de este servicio.

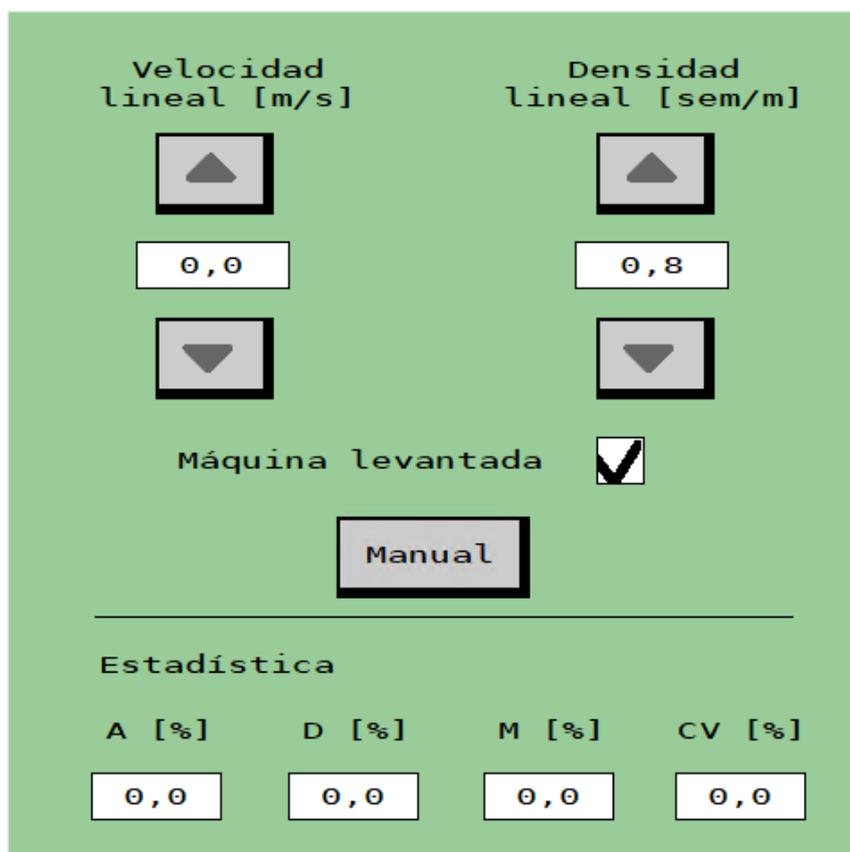


Figura 9: Terminal Virtual desarrollada para el prototipo inicial.

Esta pantalla permite que el usuario pueda tener un mejor entendimiento de cómo son visualizados los objetos, interacciones, tiempos de respuesta. Por ejemplo, al variar un parámetro como el de la velocidad lineal o la densidad permite observar, primero el tiempo en el que demora replicarse este cambio desde el simulador hasta el cuerpo de siembra, y segundo, analizar comportamientos propios del cuerpo de siembra como cambios de velocidad y funcionamiento en general a distintas velocidad del motor.

Para explicar el funcionamiento de este prototipo inicial, separaremos los dos casos en el que puede funcionar, de forma manual o automática. El primer caso permite controlar el cuerpo de siembra a través de tres variables, velocidad lineal, densidad lineal y estado de máquina levantada. El estado de la máquina levantada permite simular el sensor de clavado de la máquina, ya que no se cuenta con un cuerpo de siembra que lea esta variable físicamente (al igual que el de la velocidad del encoder). El casillero simplemente permite variar entre los únicos dos posibles estados, levantada y no levantada, en donde la ECU procesa este cambio de valor reportando al cuerpo de siembra si debe iniciar o parar en caso de ser necesario.

Como se detalló previamente, el mensaje de detención no necesita un parámetro de velocidad o de densidad, pero el de iniciar si debe además indicar el valor de estas dos variables, que pueden ser editadas a través de dos botones cada una, incrementando y decrementando sus valores dentro de ciertos rangos definidos. Para no enviar mensajes de manera innecesaria a la red CAN, se reportan únicamente los cambios de valor de cada parámetro y no de forma periódica. Esto puede no tener un efecto sobre la cantidad de mensajes en la red CAN ya que solamente hay un cuerpo de siembra conectado, pero puede ser eficiente al momento de tener una red más poblada.

Además se puede apreciar que no se permite al usuario algún tipo de configuración del cuerpo de siembra. Esto es solamente por un tema de simplicidad, en donde se conoce el identificador del cuerpo de siembra y se asume que es un cuerpo de siembra sin un encoder ni sensor de clavado. El usuario solamente tiene que conectar el cuerpo de siembra a la red y puede realizar una prueba del sistema completo sin complicaciones de configuración, en donde el objetivo del diseño inicial es mostrar la interacción de un dispositivo con una red ISOBUS a su vez con un cuerpo de siembra a medida. De esta manera se puede tener una interacción rápida con una Terminal Virtual, el Controlador de Tareas y el control sobre un cuerpo de siembra.

El botón que varía entre dos posibles textos, "Manual" y "Automático", está relacionado con una de las funcionalidades que ofrece el Controlador de Tareas, el corte por sección, que se encarga del procesamiento del estado de cada sección dentro de una tarea de siembra. Cuando se habla de estado de cada sección se está haciendo referencia a un estado que indica si cada sección debería estar sembrando en el punto actual que se ubica dentro del mapa de siembra definido. Es decir, si una sección se está moviendo por una zona del mapa en donde aún no se ha pasado previamente, el Controlador de Tareas reporta un valor para el estado actual correspondiente a ese surco, que luego el dispositivo procesa para tomar una acción sobre el único cuerpo de siembra en este caso. De esta manera la ECU puede conocer el estado de cada sección, reportado por el Controlador de Tareas, a medida que transcurre el tiempo.

En cuanto a la estadística, a medida que llegue un mensaje de este tipo desde el cuerpo de siembra, se procesan los valores para posteriormente mostrarlos en el campo correspondiente sobre la pantalla. Estas casillas son solamente de visualización, no permiten edición de ningún tipo. Y en una versión más avanzada, cuando los valores corresponden a los que lee el sensor de semillas y no los simulados como en este primer prototipo, permiten tener un mejor entendimiento de cómo está funcionando un cuerpo de siembra, o al menos cómo está funcionando el sensor de semillas, y tomar algún tipo de control sobre los mismos en caso de ser necesario.

El Controlador de Tareas permite la carga de un mapa de siembra. Para el primer prototipo se trabajó con un mapa sin referencias geográficas, pero sí con dos valores distintos de densidad de semillas objetivo, de forma de registrar el comportamiento de la ECU y los motores del cuerpo de siembra en dos condiciones distintas. El movimiento de la máquina, con el único cuerpo de siembra configurado, se realiza a través de otro simulador, para el servicio de Tractor Electronic Control Unit (TECU), que se utilizó para simular el movimiento, de forma de evaluar y procesar el corte por surco a lo largo del tiempo, detectando cambios en el estado de cada surco, y así tomar la acción correspondiente.

La figura 10 representa el prototipo inicial con todas sus partes de hardware necesarias para llevar a cabo los objetivos mencionados. El círculo con el número 1 representa la placa que controla el nodo de siembra, con dos conectores, uno para el encoder y motor, y otro para la comunicación con la ECU. El círculo con el número 2 es el motor y encoder mencionado previamente. La ECU además está conectada, como se mencionó anteriormente en el diagrama de diseño de este prototipo, a una PC para su alimentación y la comunicación a través del BUS CAN - Serie. Finalmente, el círculo con el número 3 de la imagen abarca, en una única plaqueta, los componentes que involucran al prototipo de la ECU exclusivamente.

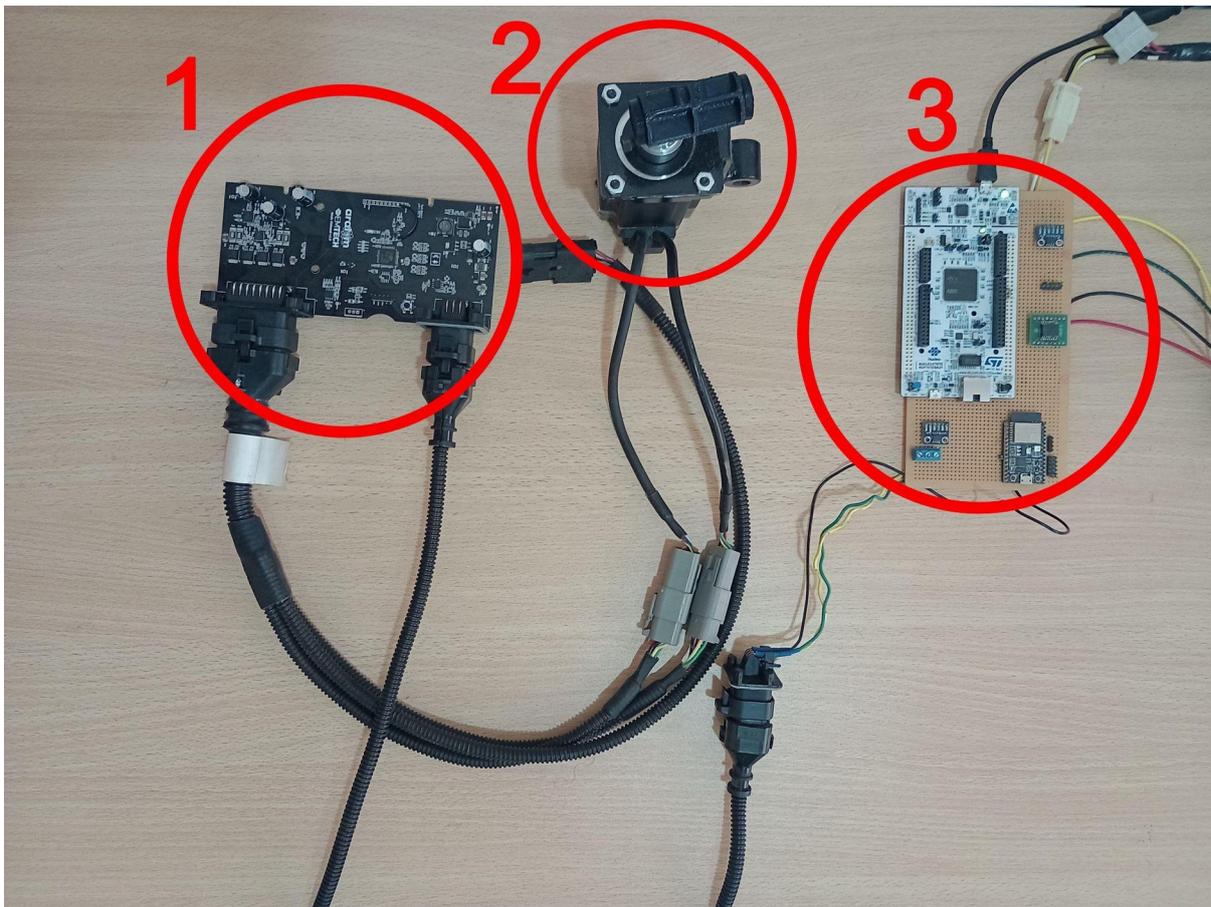


Figura 10: Hardware utilizado para el prototipo inicial.

En la figura 11 se puede observar el simulador del servicio del Controlador de Tareas, con la representación del mapa de siembra en la parte inferior delimitado por líneas rojas. La máquina, en esta caso una sembradora, representada por un rectángulo color azul y la dirección de movimiento indicada por el triángulo de color violeta. Para la simulación que se muestra en la captura, el estado del botón de la Terminal Virtual se encontraba en modo automático, representado en esta imagen en el rectángulo con el texto “SCS”, o Section Control State, de color verde. En caso de volver a modo manual en la Terminal Virtual, este rectángulo se pintará de color amarillo.

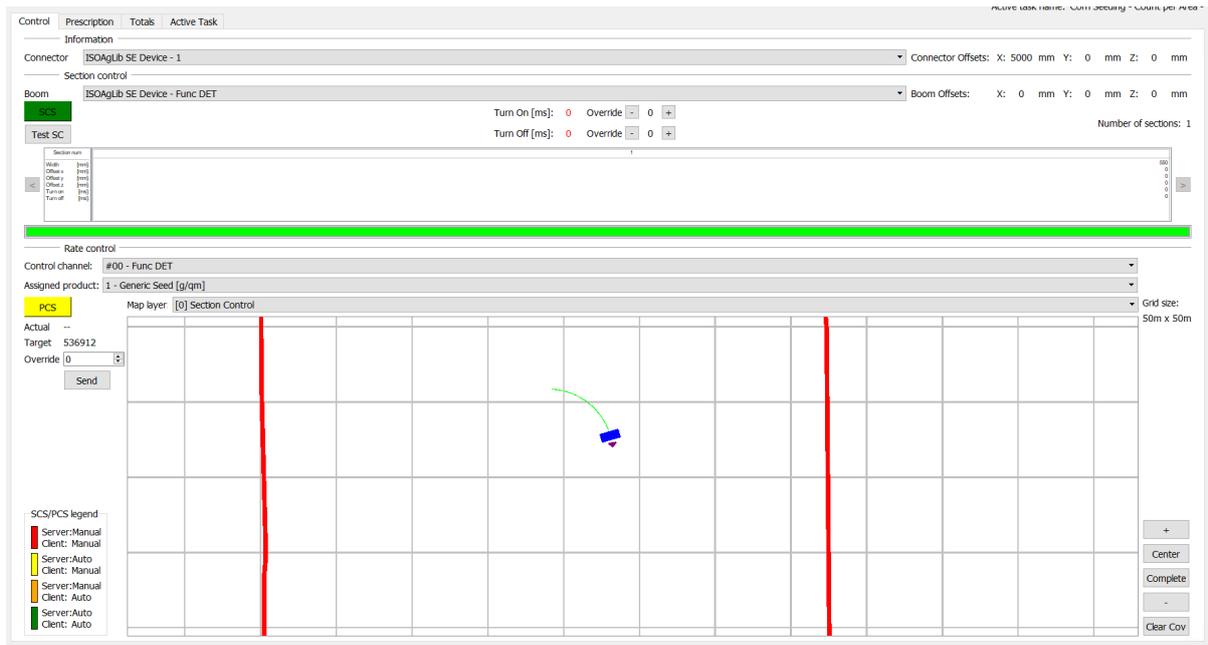


Figura 11: Simulador de Controlador de Tareas con un tractor que emula un tractor, y una franja de color verde que indica la siembra documentada.

A través de este simulador, que está conectado a la ECU corriendo en la placa de desarrollo, se puede evaluar el comportamiento del sistema viendo el estado de siembra de cada surco, representado como “secciones” en el simulador. En este caso el número de secciones es igual a uno, esperado para este prototipo inicial al tener conectado un solo cuerpo de siembra, con un ancho de 550 mm, y el estado del corte por surco representado con una barra por cada sección. En esta primer captura el estado está representado por una sola barra ocupando casi todo el ancho de la ventana de color verde. En caso de que esta sección no haya sido procesada previamente en alguna región del mapa, se pintará de color verde. En la figura 12, se muestra que la barra de estado se muestra de color rojo ya que la sembradora está pasando por una zona donde ya ha pasado previamente.

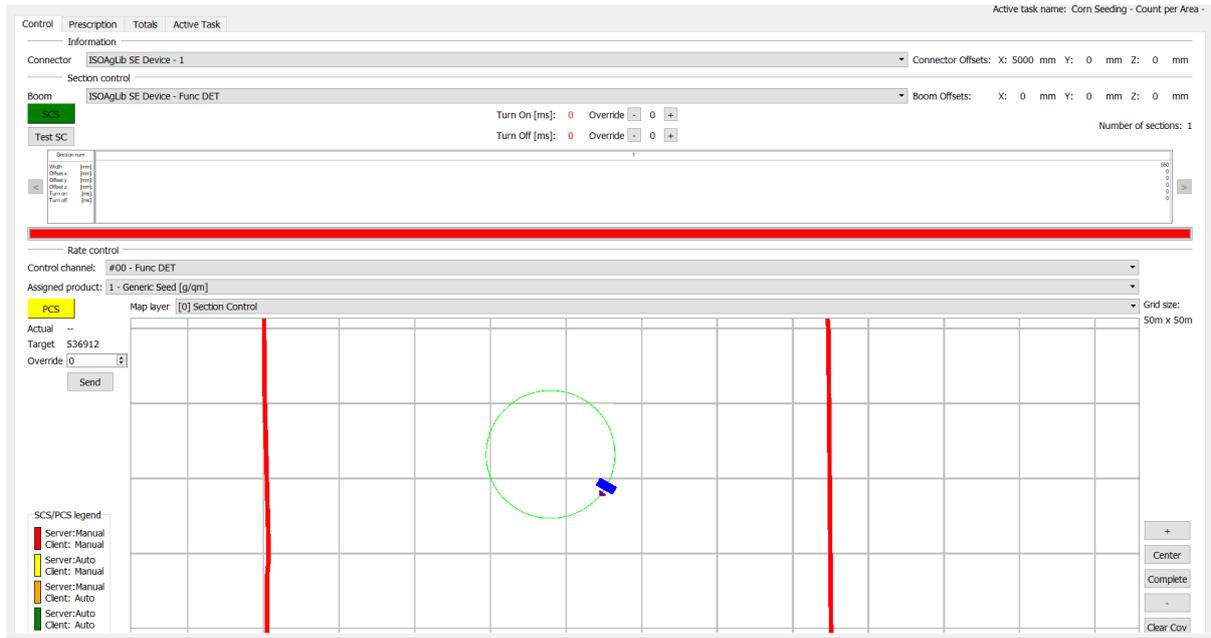


Figura 12: Simulador de Controlador de Tareas, y un caso en que la sembradora pasa por una zona que ya ha sido procesada.

5. Prototipo Final

Una vez terminado el desarrollo del prototipo inicial, se presentó al cliente para su evaluación, y discutir los resultados de manera conjunta. Se trabajó en detallar requerimientos para un prototipo de mayor complejidad, que se encarga de controlar múltiples cuerpos de siembra. Teniendo como referencia el prototipo inicial se utilizaron, para esta nueva versión, los mismos bloques de lógica con algunas modificaciones que se irán detallando posteriormente, y además, se agregan nuevas funcionalidad en los 3 bloques principales de software, resultando en el siguiente diseño general de la arquitectura propuesta:

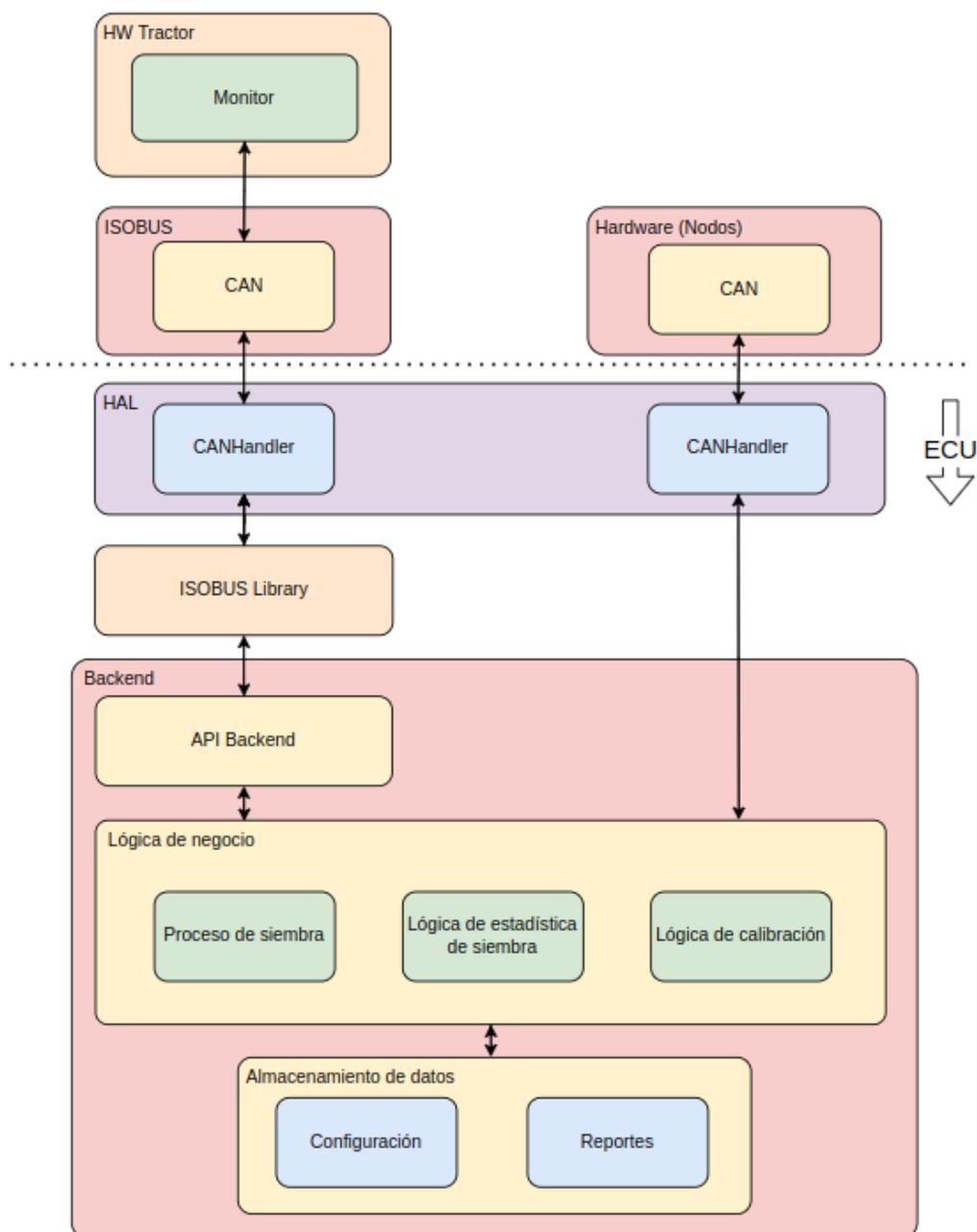


Figura 14: Diagrama general de la arquitectura propuesta del prototipo final.

Especificaciones del prototipo final

A continuación se detallan los requerimientos desarrollados en conjunto con el cliente para el prototipo final. Se detallan también algunos diagramas de casos de uso para algunas de las operaciones del sistema.

Terminal Virtual

Mediante la terminal del sistema el usuario podrá navegar por 3 menús principales:

1. Configuración
2. Calibración
3. Trabajo

Configuración

El diseño inicial de esta pantalla está pensado para organizar de manera clara y funcional las opciones de configuración de la sembradora. El objetivo es ofrecer al usuario un acceso sencillo a las configuraciones generales, específicas de cada surco y parámetros propios del proceso de siembra.

Configuraciones Generales

Esta sección reúne las configuraciones globales de la sembradora:

- **Cantidad de cuerpos de siembra:** Permite definir cuántos cuerpos de siembra estarán activos durante el proceso.
- **Ancho de la sembradora:** Ajusta el ancho total de la máquina agrícola según las necesidades de la tarea a realizar.
- **Cantidad de semillas por cuerpo:** Configura la cantidad esperada de semillas que cada cuerpo procesa, necesaria para calcular valores estadísticos.

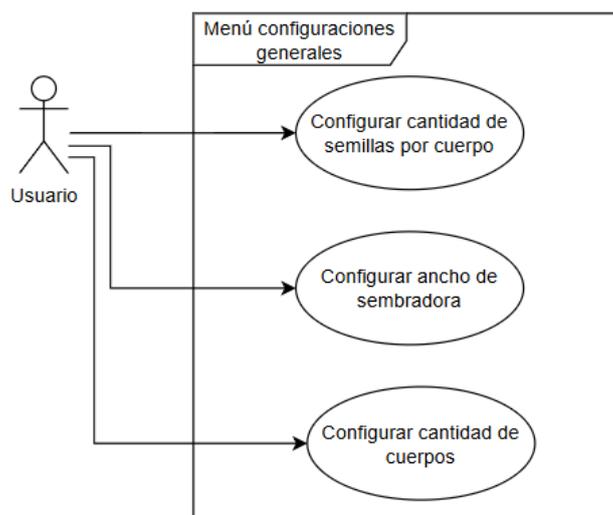


Figura 15: Diagrama de casos de uso del menú configuración general.

Configuraciones de cada cuerpo de siembra

Aquí se encuentran los ajustes individuales para cada surco, ofreciendo una personalización precisa de:

- **Ancho de cuerpo de siembra:** Ajusta el ancho de trabajo de cada cuerpo de manera independiente.
- **Tipo de cuerpo de siembra:** Permite seleccionar el tipo de cuerpo según el uso o características técnicas.
- **ID del cuerpo de siembra:** Identifica cada cuerpo de manera única para un control diferenciado.

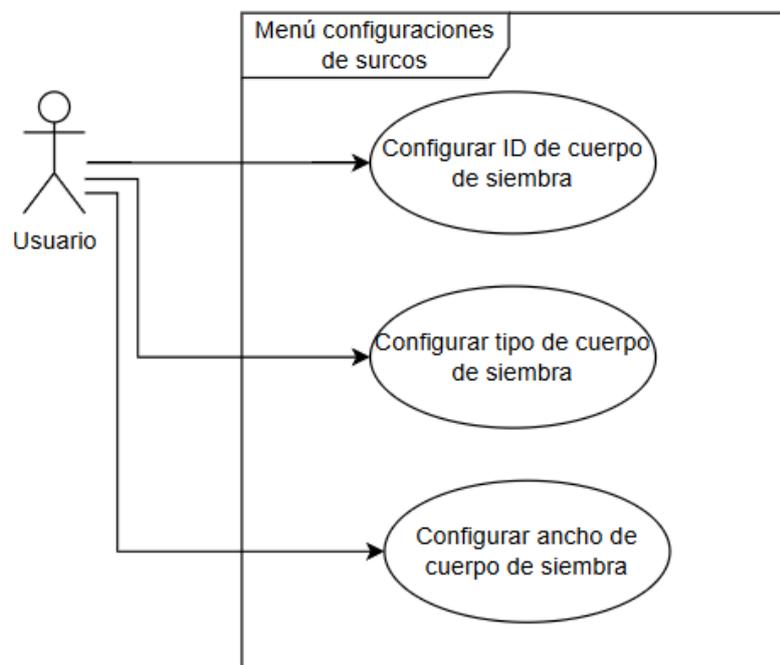


Figura 16: Diagrama de casos de uso del menú configuración de surcos.

Configuraciones específicas de siembra

Esta sección abarca los parámetros específicos relacionados directamente con el proceso de siembra:

- **Dosis objetivo:** Define la cantidad de semillas que se espera sembrar por unidad de superficie.
- **Tipo de disco:** Selecciona el disco más adecuado para el tipo de semilla o condición del terreno.
- **Posición del cepillo:** Ajusta la posición del cepillo para optimizar la distribución de semillas.

- **Presión de aire:** Configura la presión necesaria para garantizar una siembra eficiente y uniforme.

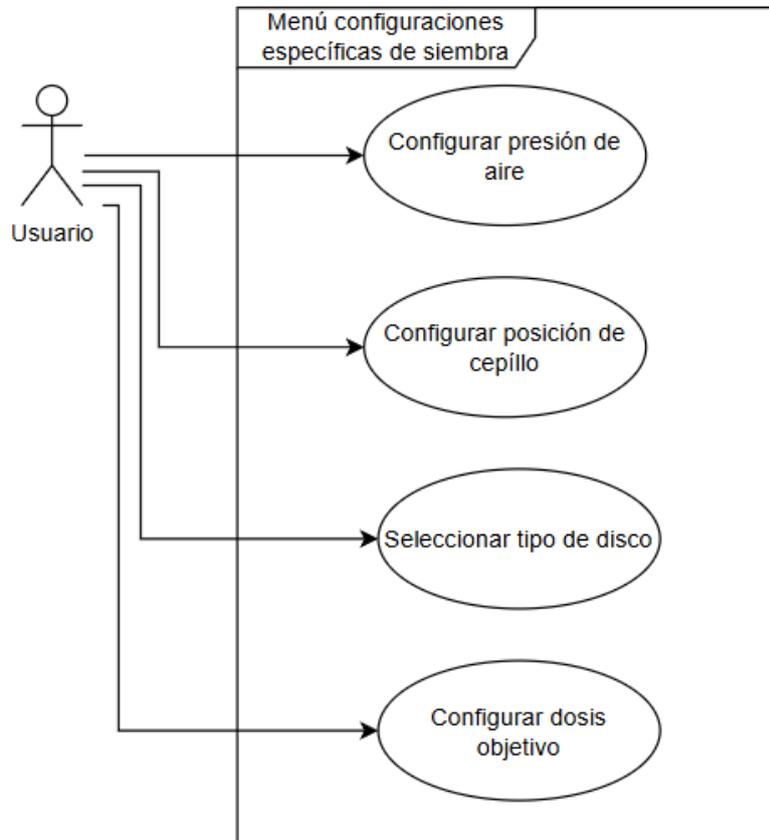


Figura 17: Diagrama de casos de uso del menú configuración de siembra.

Calibración

Este menú debe permitir al usuario poder realizar una calibración con parámetros que se ajusten a los distintos requerimientos de una calibración.

El proceso de calibración permite al usuario realizar un ajuste de los surcos de la sembradora. En una sembradora totalmente mecánica, en donde los cuerpos de siembra se mueven proporcionalmente con la velocidad de la máquina, se debe hacer una calibración con la sembradora en movimiento, por lo que el proceso puede llevar tiempo y un esfuerzo extra. Con un control electrónico sobre los motores de cada cuerpo de siembra, se puede realizar una calibración con la sembradora estática y de manera individual.

Además debe poder visualizar los resultados a medida que se vayan procesando datos estadísticos de los cuerpos de siembra, y el usuario podrá tener un reporte instantáneo del proceso que se está llevando a cabo. Finalmente la calibración de grano grueso debe

permitir variar entre tres modos de funcionamiento, individual, secuencial, y simultáneo. La figura 18 muestra los posibles casos de uso de este menú, en donde las secciones de reporte y visualización se hacen respecto a la última calibración realizada.

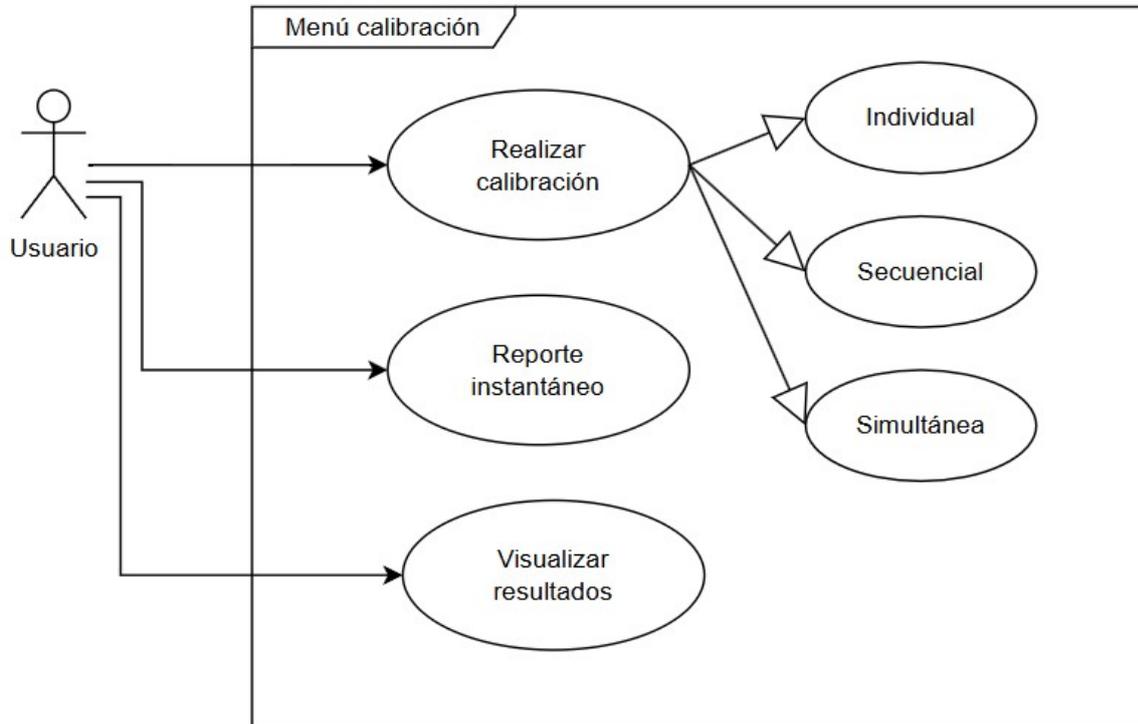


Figura 18: Diagrama de casos de uso del menú calibración.

Trabajo

Este menú se utilizará durante el proceso de siembra permitiendo realizar un control de los modos de funcionamiento, selección de la fuente de velocidad lineal, selección de la dosis objetivo y además permitirá realizar un análisis de la dosis real de la sembradora, y de la estadística individual de cada cuerpo de siembra. Esta ventana debe concentrar de manera eficiente todos estas funciones en una única pantalla para que el usuario cambie lo menos posible a otras pantallas durante el proceso de siembra.

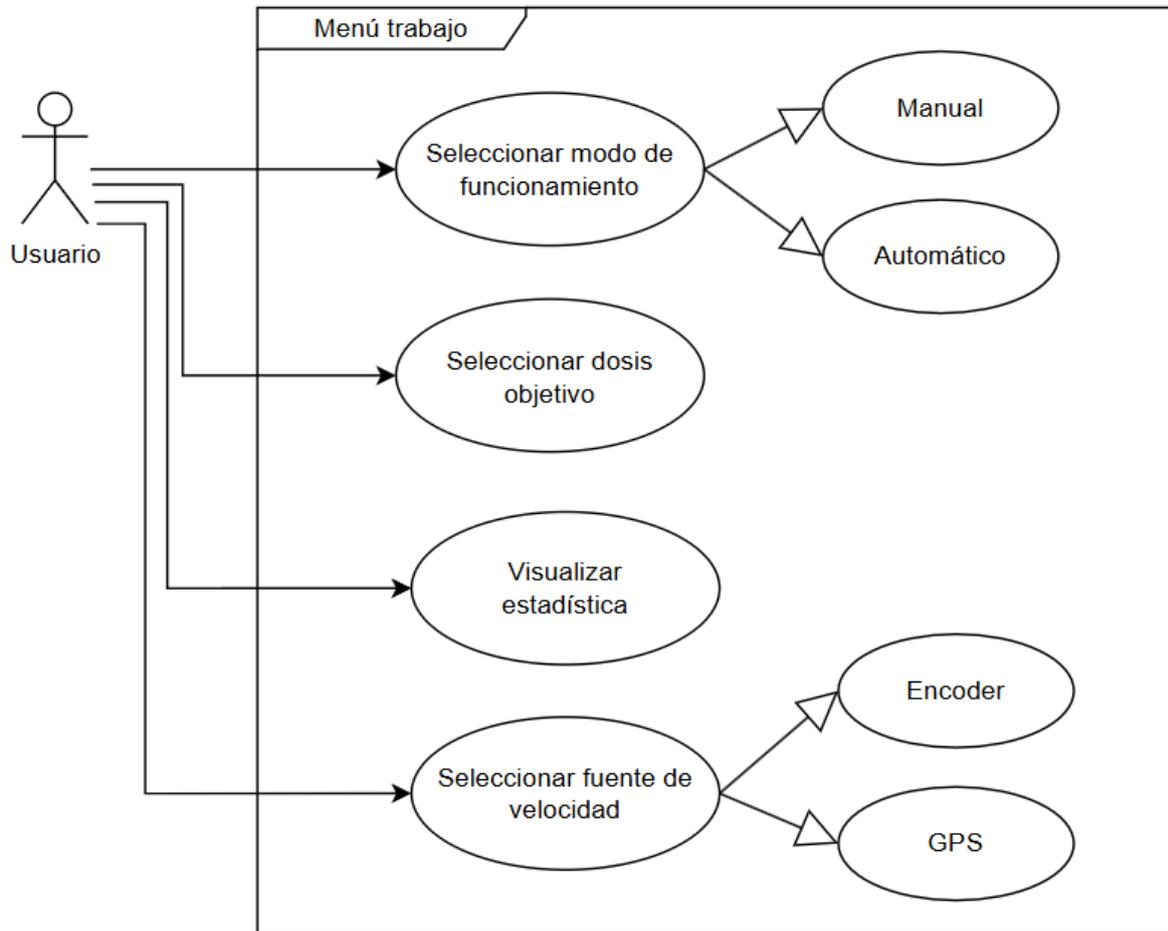


Figura 19: Diagrama de casos de uso del menú trabajo.

Estructura del software implementado

Modos de funcionamiento

La sembradora, a través de la Terminal Virtual, permite elegir entre dos modos de funcionamiento en su modo de Trabajo. Se llama modo Trabajo al estado en el que la sembradora está realizando el proceso de siembra en sí y no al modo de calibración que se hace previamente de manera estática. Desde la Terminal Virtual el cambio de modos se hace solamente a través de un solo botón, que varía entre Manual y Automático.

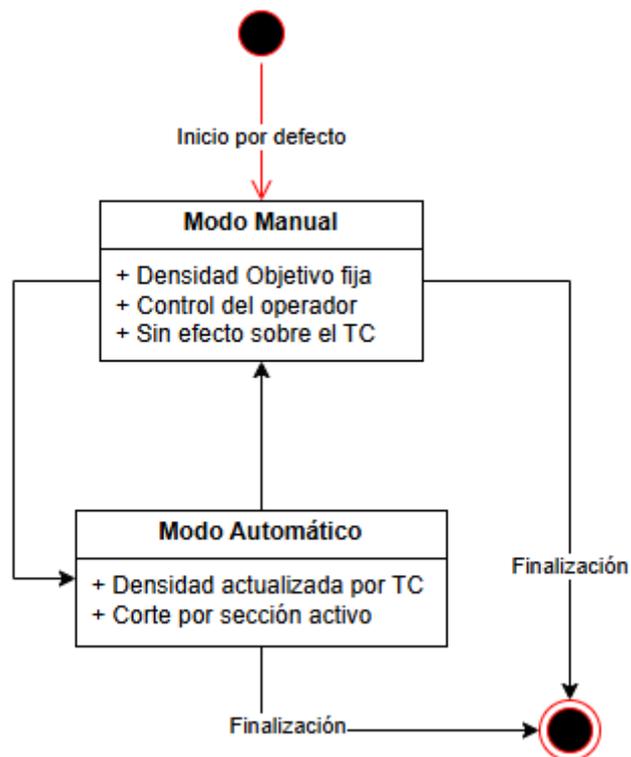


Figura 20: Diagrama de estados de los distintos modos de trabajo.

Modo manual

Por defecto, la sembradora se encuentra en modo Manual en el que la sembradora tomará como dosis objetivo, la que el usuario haya seleccionado entre los tres casilleros que ofrece el menú correspondiente, y que su vez, está relacionada al parámetro de densidad que la ECU envía a cada nodo de manera individual. En caso de no modificar este parámetro la ECU tomará la primera dosis como objetivo.

Es importante destacar que en este modo la configuración de la densidad objetivo corresponde a la que el operador haya seleccionado, y que no será modificada hasta que el operador lo haga. El Controlador de Tareas recibirá y procesará la información proveniente de la Terminal Universal, la cual se utiliza para gestionar los surcos durante el proceso de siembra. Sin embargo, en este modo de operación, el Controlador de Tareas no influirá

directamente sobre el estado o la gestión de los surcos. Es decir, no realizará ajustes automáticos en la distribución de los surcos ni en su funcionamiento. Por lo tanto, la responsabilidad de asegurar que las áreas sembradas se superpongan de manera adecuada en el campo recae completamente en el operador. Este deberá asegurarse manualmente de que las áreas de siembra se alineen correctamente y que no haya vacíos o superposiciones indeseadas entre los surcos, garantizando así un proceso de siembra eficiente y preciso.

Además en este modo el Control de Surcos, será controlado totalmente por el cliente y no por el servicio que si lo hace en modo automático, es decir que los mensajes para realizar la documentación del Controlador de Tareas dependerá exclusivamente de la ECU y cómo se vaya procesando el proceso de siembra a lo largo del tiempo.

Modo automático

Al trabajar en modo automático, la ECU actualiza el valor de densidad objetivo con el valor que le indique el Servidor del Controlador de Tareas. Éste, a través del mapa de siembra, le indica al cliente cada vez que deba actualizar este parámetro, al igual que el estado de Corte por Sección que indica el estado de cada sección de manera individual. Este estado indica simplemente si la sección debería estar sembrando, por más que la sembradora se esté moviendo, pero la decisión final la toma la ECU, actualizando el parámetro que indica al nodo correspondiente si debe sembrar o no.

Lectura de velocidad lineal

La sembradora necesita tener un valor de referencia de la velocidad lineal para poder replicarlo a los nodos. En este caso podría obtenerlo de dos maneras distintas, una es a través de un GPS que tenga comunicación ISOBUS con la misma red a la que está conectada la ECU y la otra a través de uno o más encoders conectados a los nodos. Al igual que el cambio entre modos de funcionamiento, el cambio de fuente de lectura de velocidad lineal se hace únicamente a través de un botón que varía entre lectura de GPS y lectura de Encoder.

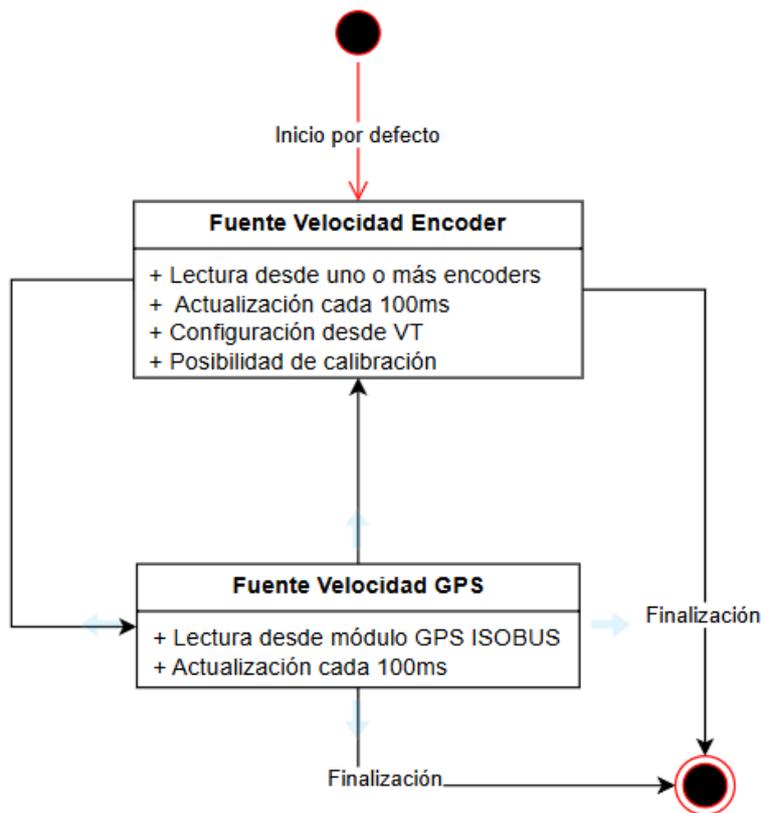


Figura 21: Diagrama de estados de las distintas fuentes de velocidad.

Lectura de velocidad GPS

En caso de que a la misma red ISOBUS donde están conectadas la Terminal Virtual y la ECU haya un módulo GPS, se pueden aprovechar los mensajes de actualización que envía a la red de manera global. Para esta caso se utiliza el valor de la velocidad lineal únicamente, pero se podrían aprovechar también mensajes como la dirección, fecha, hora, posición.

El módulo envía a la red el valor de velocidad lineal cada 100 ms con una precisión de 0.001 m/s.

El mensaje que contiene información sobre la velocidad lineal del mismo, viene dividida en el campo *data* del mensaje CAN, por lo que debe ser procesada:

Lectura de velocidad de Encoder

También se podría tener una fuente de la velocidad lineal que no dependa de un módulo GPS, y que pueda ser instalado por el dueño de la sembradora, ya que se puede agregar como una conexión extra al nodo de siembra. Es importante destacar que el encoder que sea conectado al nodo, luego debe ser configurado desde la Terminal Virtual, para que la ECU pueda indicarle al nodo correspondiente que debe procesar los mensajes del Encoder

y enviarlos a la ECU posteriormente. La Terminal Virtual permite la calibración del Encoder en caso de ser necesario.

Si el usuario lo desea, puede no conectar un encoder a la sembradora si es que posee otra fuente de velocidad lineal, y también podría conectar uno o múltiples encoders para tener mejor precisión de este parámetro. En el caso más extremo, incluso se podrían conectar Encoders en todos los cuerpos de siembra.

Conectar múltiples encoders en la sembradora, permitiría tener una mejor aproximación de la velocidad lineal de la sembradora en distintos puntos, que podrían ser útiles para los casos en que una parte de la sembradora tenga una velocidad distinta de otra parte de la sembradora, como el caso de un giro o incluso pequeñas desviaciones.

Procedimiento de conexión de nodos de siembra

Inicialmente la ECU no tiene conocimientos de los nodos conectados a la red, y es tarea del usuario realizar la primera configuración o un cambio posterior de la disposición de los mismos.

A través del menú Configuración de surcos, el software implementado permite al usuario indicar el identificador único de cada nodo con la posición que ocupa en la sembradora. Cuando un nuevo nodo se agrega a la red, se agrega a la lista este identificador y el usuario indica qué posición de la máquina corresponde. Una vez que se selecciona este valor al surco, se quita de la lista con identificadores disponibles, para que no sea tenido en cuenta en la configuración de los siguientes surcos.

En caso de requerir, el usuario podría desvincular el identificador al surco correspondiente. En caso de que el nodo siga conectado a la red, podrá ser visible nuevamente en la lista de identificadores disponibles. Esto puede ser muy útil para el caso en que por error algún nodo haya sido vinculado a un identificador de manera errónea, o si por alguna razón un nodo tuvo que ser removido de la máquina y no sería necesario configurar todos los surcos nuevamente.

Cuando el cuerpo de siembra ha sido configurado como parte de la sembradora, el usuario no tendrá que repetir este proceso cada vez que se reinicie por alguna razón la ECU. Los nodos enviarán periódicamente un mensaje con el pedido de configuración en caso de que se necesite, o si la ECU se reinicia pero los cuerpos de siembra no, como proceso de inicialización se envía un mensaje de configuración a cada uno de los cuerpos de siembra que estén almacenados en memoria permanente.

La figura 22 muestra el diagrama de secuencias correspondiente al proceso de inicialización de nodos implementado.

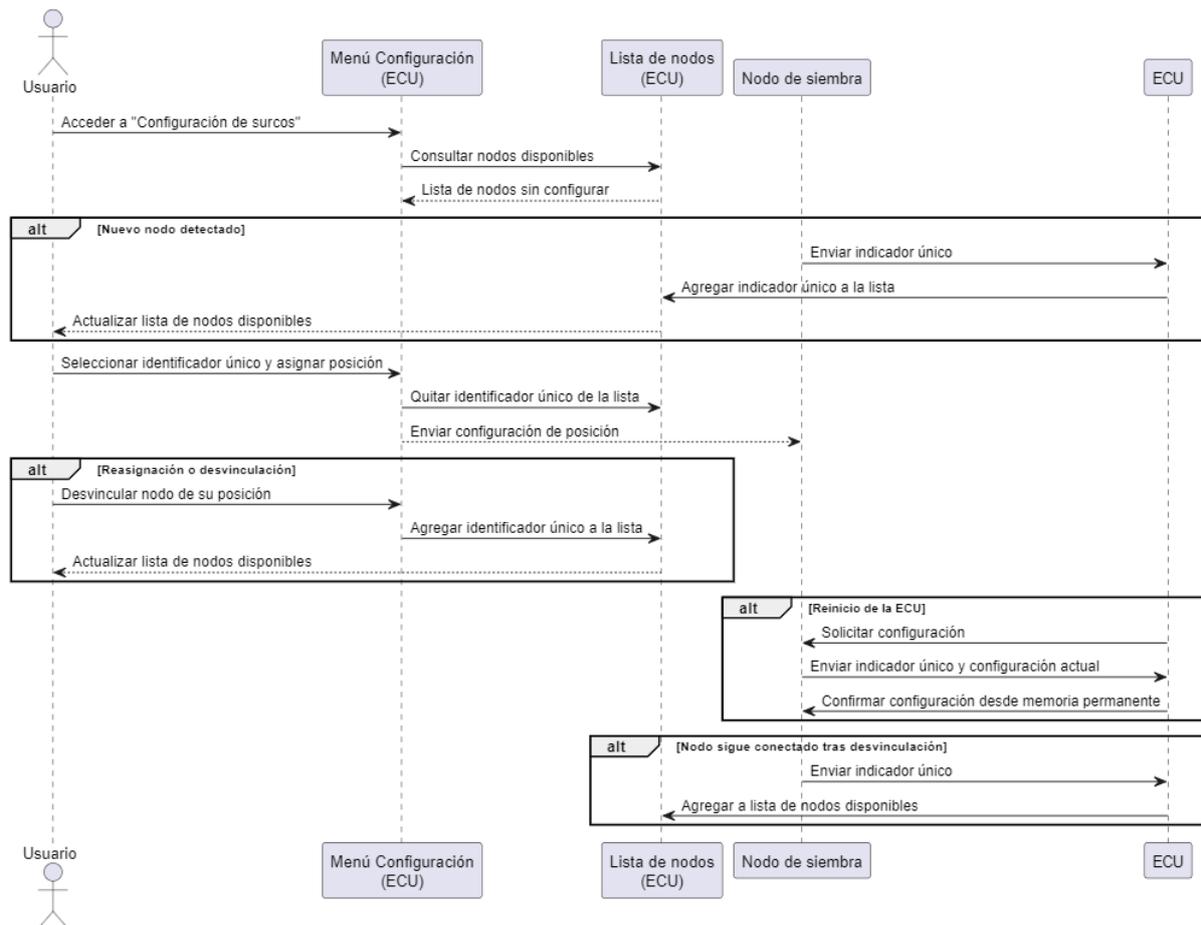


Figura 22: Diagrama de secuencia de inicialización de nodos.

La palabra clave **alt** se usa en el diagrama de secuencias para representar alternativas que pueden ocurrir bajo ciertas condiciones. Visualmente, esto se traduce en un bloque dividido en secciones, cada una describiendo un camino alternativo.

1. **Nuevo nodo detectado:**
 - Si un nodo nuevo se conecta, se sigue la rama donde este se agrega a la lista de nodos disponibles.
2. **Reasignación o desvinculación:**
 - Si el usuario decide desvincular un nodo, se sigue esta rama, y el nodo vuelve a estar disponible en la lista.
3. **Reinicio de la ECU:**
 - Si la ECU se reinicia, se ejecuta la rama donde se solicitan y envían configuraciones a los nodos.

Calibración

La calibración permite realizar un ajuste de las características de la sembradora en general y de los cuerpos de siembra individualmente. En la sembradora, porque por ejemplo, el aire que llega a cada cuerpo de siembra tiene un efecto en cómo se acomoda cada semilla en el disco de siembra. Poca presión de aire podría generar faltantes de semillas en el proceso

de siembra, y mucha presión de aire podría generar exceso de semillas. Por lo que realizar una simulación de la siembra de manera estática permite al operador poder visualizar cómo se comporta cada cuerpo de siembra con ciertos ajustes mecánicos, permitiendo repetir el proceso las veces que sea necesario, y con la densidad de semillas deseada.

El proceso de calibración, sin importar el tipo, varía de manera incremental entre cuatro velocidades distintas, 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s y 2.5 m/s, con un valor de densidad objetivo definida por el usuario. Al comenzar el proceso, la ECU envía el valor de densidad que haya sido seleccionado con la primera de las velocidades predeterminadas, 1 m/s, al nodo que corresponda, y el nodo a través del sensor de caída de semillas generará un reporte de estadística que será enviado a la ECU. Cuando la ECU reciba estos parámetros, se actualizarán en pantalla y además se indica al nodo que debe repetir el proceso con la siguiente velocidad, 1.5 m/s, y así sucesivamente hasta llegar al último valor de velocidad, en donde la ECU le indicará al nodo que debe parar el proceso.

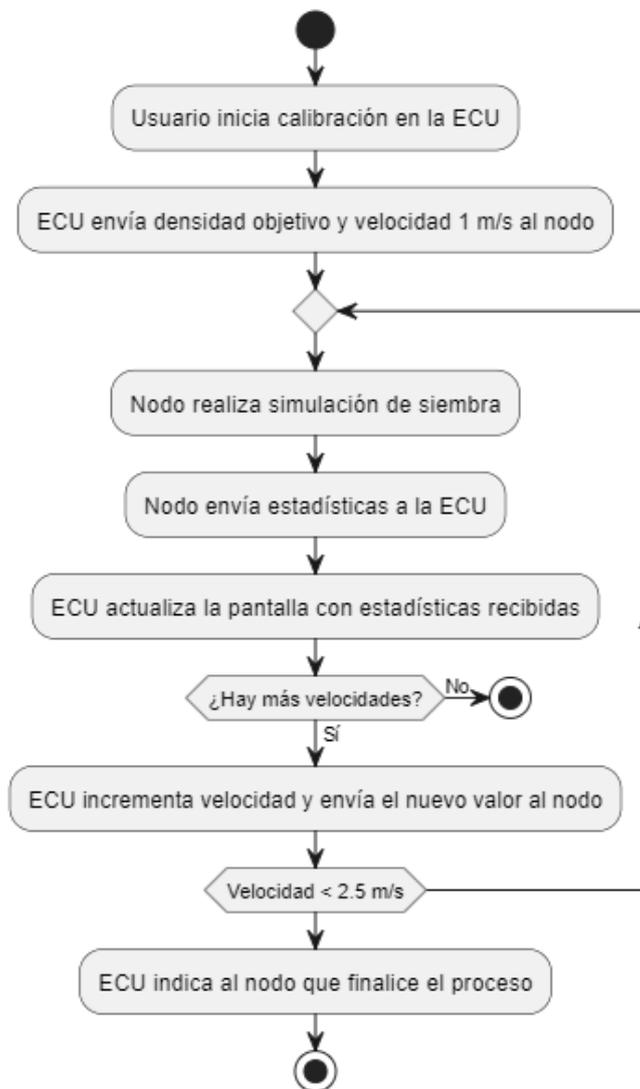


Figura 23: Daigramas de estados del proceso de calibración.

La Terminal Virtual permite realizar tres tipos de calibraciones distintas:

Calibración individual

Este tipo de calibración se basa en realizar el proceso desde el primer valor de velocidad pasando por los demás valores predefinidos, hasta que el disco de siembra seleccionado queda detenido.

Calibración secuencial

En este caso el proceso es una secuencia de múltiples calibraciones individuales, comenzando por el surco que se haya seleccionado hasta el surco con el valor de posición más alto dentro de la sembradora. Es decir, si se seleccionó comenzar por el surco 5 en una sembradora con un total de 20 surcos, la calibración se realizará comenzando por el surco 5 e incrementando el surco a calibrar de manera incremental hasta el surco 20. Cabe destacar que si la ECU no recibe parámetros estadísticos de alguno de los surcos, ya sea o porque el sensor de semillas no está realizando mediciones, o la comunicación con los nodos esté fallando, la ECU no podrá avanzar con el proceso de calibración y quedar en este estado indefinidamente.

Calibración simultánea

La de tipo simultánea realiza una calibración de todos los nodos configurados de manera simultánea, incrementando el valor de velocidad lineal una vez que la ECU recibe parámetros estadísticos de todos los surcos. De manera análoga a la calibración secuencial, en este caso si por alguna razón no se reciben parámetros estadísticos de alguno de los surcos, la ECU no podrá avanzar con el siguiente estado del proceso de calibración y permanecer en estado indefinidamente.

Desarrollo de pantallas

En esta sección se presentan las pantallas diseñadas e implementadas en el cliente de la Terminal Virtual, desarrolladas específicamente para este prototipo. Estas pantallas fueron diseñadas con el objetivo de ofrecer una interfaz gráfica intuitiva y funcional que facilite la interacción del usuario con los diferentes componentes del sistema.

Cada pantalla fue desarrollada para asegurar que el usuario pueda acceder de manera eficiente a las funciones clave del sistema. Cada una incluye elementos gráficos como botones, menús desplegables, indicadores, los cuales están organizados para facilitar el acceso a las opciones más relevantes.

Pantalla de Configuración



Figura 24: Pantalla de configuración ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Esta pantalla se divide entre configuraciones generales, que permiten visualizar y editar parámetros generales como la cantidad de surcos de la sembradora, tipo de siembra, navegar a otros tipos de configuraciones.

El tipo de siembra permite combinar entre:

- Grano Grueso
- Grano Fino
- Fertilizante 1

- Fertilizante 2
- Pastura

Luego está la ventana de configuración de surcos, en donde se permite editar parámetros específicos de cada surco, como el ancho de surco en caso de que se desee realizar individualmente, tipo de surco, ya sea cuerpo de siembra, encoder, sensor de semillas o una combinación de alguna de éstas, y también el ID del surco a través de un menú desplegable.

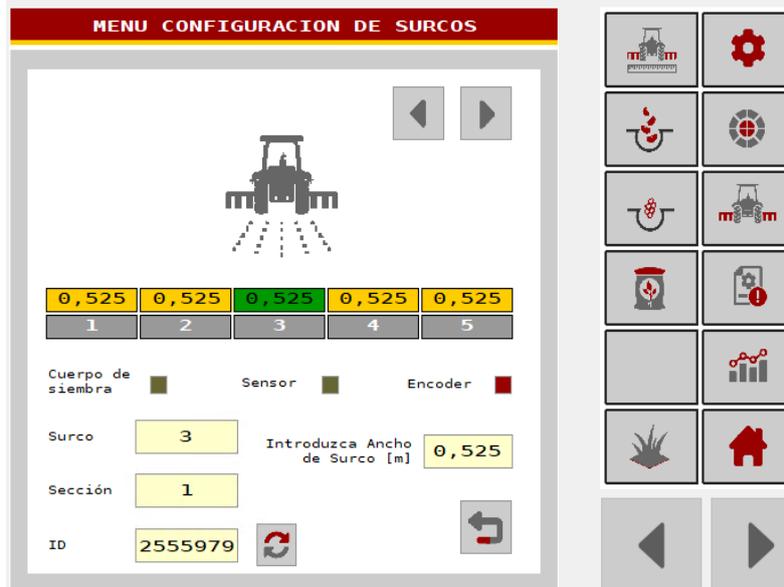


Figura 25: Pantalla de configuración de surcos ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

La ventana de configuración de alarmas que permite editar los valores de umbral de cada uno de los parámetros estadísticos.



Figura 26: Pantalla de configuración de alarmas ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Al seleccionar algunos de los casilleros de tipo de siembra, se habilitará un botón para navegar a una nueva ventana única para cada casilleros seleccionados. Dependiendo de qué tipo de siembra se quiera editar, la ventana de configuración será distinta.

La configuración de grano grueso permite editar el valor de tres dosis de semillas, en dos unidades distintas, semillas/m o semillas/hec. Al editar una dosis, se actualiza de acuerdo a la separación entre surcos, su misma dosis pero en la unidad que no haya sido modificada. Esto permite ingresar hasta tres valores de dosis de semillas objetivo en dos unidades distintas para la comodidad del usuario. Además hay otros campos configurables dentro de esta pantalla, como la posición del cepillo, tipo de semilla, tipo de disco, etc. que son específicos de esta sembradora en específico.

La pantalla de grano fino es similar a la de grano grueso, salvo por los campos editables de densidad ya que este tipo de grano no se mide en cantidad, sino por pero, permitiendo editar solamente un campo de densidad objetivo en kg/vuelta de disco.

Pantalla de Calibración

La pantalla de calibración permite realizar calibración de los distintos tipos de grano, fertilizantes y pasturas, con la posibilidad también de ver un reporte en tiempo real. Además de estos tipos de calibraciones también se puede realizar una específica para un encoder, utilizado para tomar de referencia de la velocidad lineal de la sembradora.

Como pantalla principal de calibración el usuario verá lo siguiente:

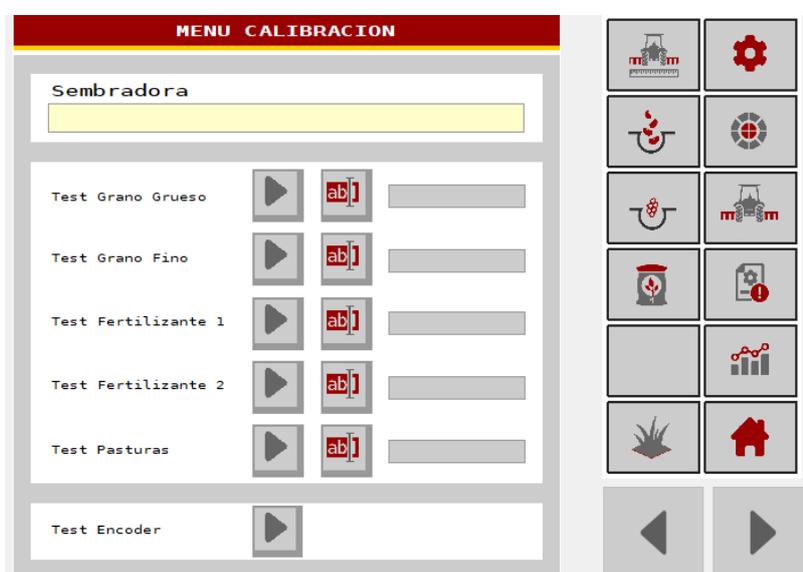


Figura 27: Pantalla general de calibración ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Se puede apreciar que por cada tipo de siembra, fertilizante o pastura hay un par de botones. El primero, mirando de izquierda a derecha, permite navegar a una nueva pantalla que se encarga del control del proceso de calibración y se mostrará más adelante para el caso de grano grueso. El segundo botón permite también navegar a una nueva pantalla, pero ésta es un reporte del último proceso de calibración llevado a cabo para ese tipo de grano, fertilizante o pastura.

Por último podemos navegar a una calibración de encoder, ubicado en la parte inferior de la pantalla, y no permite la posibilidad de reporte como si lo hacen los anteriores.

La pantalla de calibración para el caso de grano grueso permite, primero, realizar una pequeña configuración previo al inicio de la misma. La calibración, como se mencionó anteriormente, puede ser individual, secuencial o simultánea, permitiendo seleccionar alguna de estas con un casillero dedicado a cada una. Por defecto la calibración individual será la seleccionada con un campo editable a la derecha de este casillero que permite seleccionar el cuerpo de siembra a calibrar de manera individual. Esto puede ser útil si el usuario desea iniciar el proceso de algún cuerpo de siembra específico de manera rápida.



Figura 28: Pantalla de calibración de grano grueso ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Por debajo se pueden visualizar cuatros bloques de gráficos de barra con un indicador del valor de velocidad para cada uno. Esto es debido a que la calibración se realiza en cuatro velocidades distintas, y que se irán actualizando a medida que lleguen valores estadísticos. A diferencia del reporte, estos bloques tienen la finalidad de ofrecer una visualización gráfica de todos los cuerpos de siembra y no tan precisa como si lo hace el reporte.

En la parte inferior de la pantalla además hay dos botones para variar el valor estadístico que se está visualizando actualmente, en la imagen se puede ver que la opción seleccionada es “Calidad” que hace referencia a la calidad de siembra. A medida que se modifique este parámetro los gráficos de barra también lo harán de manera automática.

Si desde el menú principal de calibración se selecciona el que permite la navegación al reporte de grano grueso se podrá observar la siguiente pantalla:

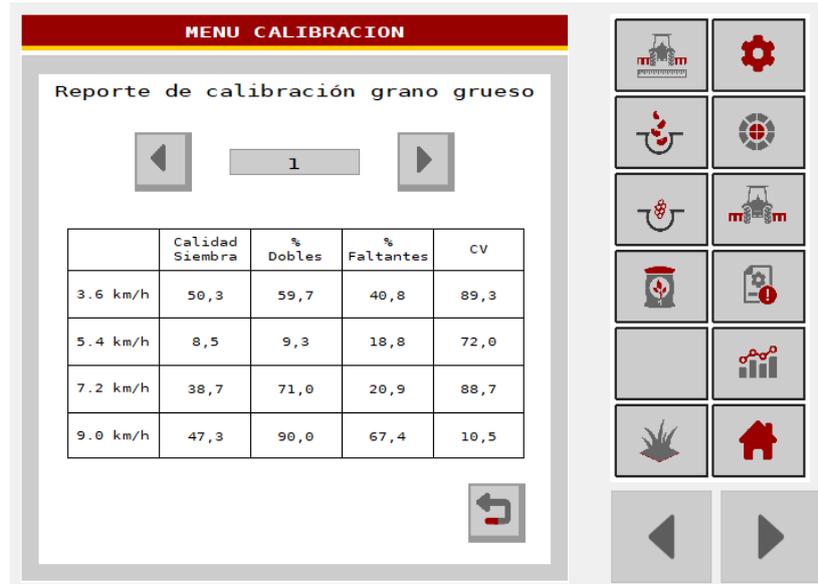


Figura 29: Pantalla de reporte de calibración de grano grueso ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Esta pantalla tiene como finalidad mostrar numéricamente los valores representados en la pantalla anterior. Esto puede ser útil ya que ofrece mayor precisión de los parámetros estadísticos recibidos por cada cuerpo de siembra, combinando en una única tabla los cuatro parámetros con los cuatro valores de velocidad a los que fue sometida la prueba.

A través de dos botones el usuario puede modificar el valor del cuerpo de siembra visualizado, decrementando con el botón de la izquierda e incrementando con el botón de la derecha del índice de cuerpo de siembra.

Analizar los resultados de una prueba de esta manera permite comparar cómo varían los parámetros estadísticos para las distintas velocidades de siembra, y poder tomar una decisión de a qué velocidad se realizará el proceso de siembra en sí. Es decir, previo a que la máquina esté sembrando, podemos realizar ajustes de otros parámetros que pueden influir en la calidad de una siembra, como presión de aire, posición de cepillo, tamaño y/o imperfecciones de una tanda de semillas, ya dentro de una misma variedad de semilla podrían haber muchas variantes en cuanto a tamaño y forma lo que podrían generar un impacto sobre el resultado final de la siembra.

El cliente posee sembradoras que funcionan completamente a través de movimientos mecánicos, es decir, que para que los cuerpos de siembra se muevan, la sembradora se tiene que mover y así transferir por medio de engranajes mecánicos, este movimiento a los cuerpos de siembra. Esto genera que el proceso de calibración se tiene que hacer exclusivamente con la sembradora moviéndose, lo que lo hace un proceso más difícil.

Pantalla de Trabajo

En esta pantalla se pueden visualizar algunos parámetros estadísticos de los nodos en proceso de siembra, no así los de calibración que tiene su pantalla dedicada. En la parte superior se muestran el valor de densidad objetivo y un valor de densidad aplicada, con este último correspondiente a un promedio de cada uno de los valores de densidad aplicada de los cuerpos de siembra. Luego, más abajo, se pueden visualizar los valores de calidad de siembra, coeficiente de variación, faltantes y dobles de hasta treinta nodos simultáneamente. Por defecto se muestra el valor de calidad de siembra de los nodos, permitiendo variar el parámetros a mostrar a través de dos botones que al presionarlos, actualizará el gráfico de barras de este nuevo parámetros estadístico.

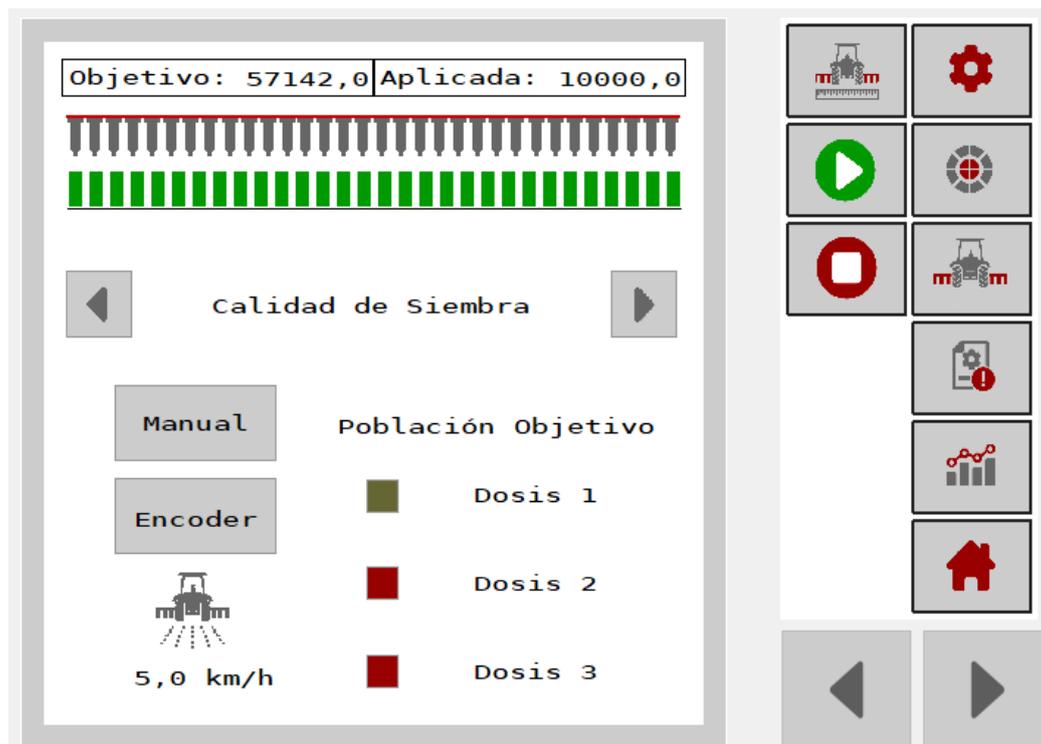


Figura 30: Pantalla de Trabajo ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

El gráfico tiene como eje central horizontal, el valor que haya sido configurado como alarma para el actual parámetro estadístico. A medida que llegue un valor del parámetro estadístico seleccionado de algún nodo, la ECU actualizará el gráfico en la posición correspondiente de la siguiente manera:

Para el caso de la calidad de siembra, que un valor superior al valor de alarma configurado corresponde a un valor deseado en una siembra, corresponde la siguiente lógica:

- Si el nuevo valor procesado es inferior al valor configurado como alarma para este parámetro, se dibuja una barra por debajo del eje central de color rojo proporcional a la diferencia del valor de alarma y este nuevo valor.
- Si el nuevo valor procesado es superior al valor configurado como alarma para este parámetro, se dibuja una barra por encima del eje central de color verde proporcional a la diferencia del valor de este nuevo valor y el valor de alarma.

- Si el nuevo valor procesado es igual al valor configurado como alarma para este parámetro, se borra cualquier barra que haya dibujada para este nodo en caso de que lo haya, y no se pintará ninguna barra nueva para este caso.

Para los casos de coeficiente de variación, faltantes y dobles, que un valor inferior al valor de alarma configurado corresponde a un valor deseado en una siembra, corresponde la siguiente lógica:

- Si el nuevo valor procesado es inferior al valor configurado como alarma para este parámetro, se dibuja una barra por debajo del eje central de color verde proporcional a la diferencia de este nuevo valor y el valor de alarma.
- Si el nuevo valor procesado es superior al valor configurado como alarma para este parámetro, se dibuja una barra por encima del eje central de color rojo proporcional a la diferencia del valor de alarma y este nuevo valor.
- Si el nuevo valor procesado es igual al valor configurado como alarma para este parámetro, se borra cualquier barra que haya dibujada para este nodo en caso de que lo haya, y no se pintará ninguna barra nueva para este caso.

Luego se puede observar un botón con el texto “Manual” que permite variar entre los modos de funcionamiento mencionados anteriormente, y que al presionarlo se cambiará a modo automático con el texto “Automático”. El primero tomará como valor de dosis objetivo la que esté seleccionada en esta pantalla y el control de corte por surco será controlado totalmente por la ECU. El segundo procesa este valor de acuerdo a lo que recibe del Controlador de Tareas y el control por surco está comandado totalmente por el Controlador de Tareas y la ECU no tiene el control sobre éste, pero si puede recibir el estado del corte por surco para tomar decisiones sobre cómo controlar los cuerpos de siembra.

Para mostrar su funcionamiento se mostrará primero el caso del modo automático para luego mostrar el modo manual y evaluar diferencias.

Funcionamiento con simuladores y 5 cuerpos de siembra

Para evaluar de manera exhaustiva la integración de los módulos desarrollados y su interacción con la Terminal Virtual y el Controlador de Tareas en el control de cuerpos de siembra en una sembradora, se diseñó un escenario de prueba específico. Este entorno combina simuladores de servicios ISOBUS ejecutados en una PC y cinco nodos, con sus cuerpos de siembra, conectados físicamente a la ECU. Este planteo permitió analizar tanto el comportamiento individual de cada componente como la interacción y coordinación entre las distintas partes del sistema.

El objetivo central de esta prueba fue verificar la capacidad del sistema para manejar múltiples nodos de siembra de forma eficiente, garantizando que los diferentes componentes de hardware y software trabajen de manera coordinada y sincronizada. Los simuladores utilizados en esta configuración emularon las funcionalidades de la Terminal Virtual y el Controlador de Tareas, mientras que los cinco cuerpos de siembra replicaron las condiciones reales de trabajo de una sembradora.

En la figura 31 se puede apreciar el simulador del servidor del Controlador de Tareas, en donde se observa una barra verde en la parte superior dividida en cinco secciones, una por cada cuerpo de siembra. Por encima de esta barra se muestra la configuración geométrica de cada cuerpo, reflejando el ancho de sección definido en el menú de Configuración de

Secciones de la Terminal Virtual. Este valor se expresó en milímetros y, para esta prueba, todas las secciones se configuraron con un ancho uniforme de 550 mm. El color de cada sección indicó el estado instantáneo reportado por el Controlador de Tareas respecto al corte por surco. El color verde, en este caso, representa que la sección debería estar sembrando en ese momento, mientras que el color rojo indica que no debe sembrar debido a condiciones específicas, como áreas del terreno ya trabajadas previamente, o que la máquina está fuera del mapa de siembra.

La ECU desempeñó un papel fundamental en el procesamiento de estos reportes. Cada cambio de estado recibido del Controlador de Tareas fue interpretado por la ECU, que luego generó las acciones necesarias para los cuerpos de siembra. Por ejemplo, si el Controlador de Tareas reportaba que una sección debía sembrar, la ECU enviaba al cuerpo correspondiente un mensaje con la instrucción para activar la siembra, ajustando simultáneamente los parámetros de densidad de semillas y velocidad lineal según lo indicado. El cliente del Controlador de Tareas en la ECU se configuró para recibir únicamente reportes de cambios de estado, lo que optimizó la gestión de la comunicación y redujo el procesamiento innecesario.

En el simulador, la sembradora se representó como un rectángulo azul con un triángulo indicando su dirección de movimiento. La velocidad y dirección del desplazamiento se determinaron mediante otro simulador, encargado exclusivamente de generar estos valores y enviarlos al servidor del Controlador de Tareas. Esta funcionalidad permitió observar cómo el sistema reflejaba los cambios de velocidad lineal en los movimientos y ajustes de los cuerpos de siembra.

Un ejemplo práctico de este comportamiento fue documentado cuando se mostró un cambio en el estado del corte por surco. En un caso, tres secciones estaban activas (color verde), mientras que las otras dos (color rojo) permanecían inactivas porque la máquina había pasado previamente por esas áreas del mapa. En esta situación, la ECU enviaba a los cuerpos de siembra correspondientes un mensaje indicando que no debían sembrar.

Además, la lógica evaluada incluyó el manejo de cambios en la densidad de semillas. Para esta prueba, se utilizó un mapa con densidades variables entre 60,000 y 80,000 semillas por hectárea. El servidor del Controlador de Tareas generaba reportes de cambios en los valores de densidad, que eran procesados por la ECU para ajustar el comportamiento de los cuerpos de siembra en tiempo real. Esto demostró cómo las variaciones de densidad se reflejaban directamente en los movimientos y operaciones de los nodos de siembra.

Finalmente, se probó el impacto de los cambios de velocidad lineal en los cuerpos de siembra. A medida que el simulador ajustaba la velocidad de la máquina, estos cambios eran transmitidos a la ECU para su procesamiento y posterior aplicación en los cuerpos de siembra. Esto permitió validar la capacidad del sistema para reaccionar rápidamente a condiciones dinámicas y mantener un control preciso en todo momento.

La prueba se llevó a cabo utilizando el modo "Automático" de control de surcos configurado en el menú de trabajo de la Terminal Virtual. En este modo, la documentación del proceso de siembra se generó automáticamente a medida que la sembradora se desplazaba por el mapa. Sin embargo, el control y la gestión de los cuerpos de siembra se delegaron completamente a la ECU, mostrando su capacidad para operar de manera autónoma y eficiente en un entorno simulado.

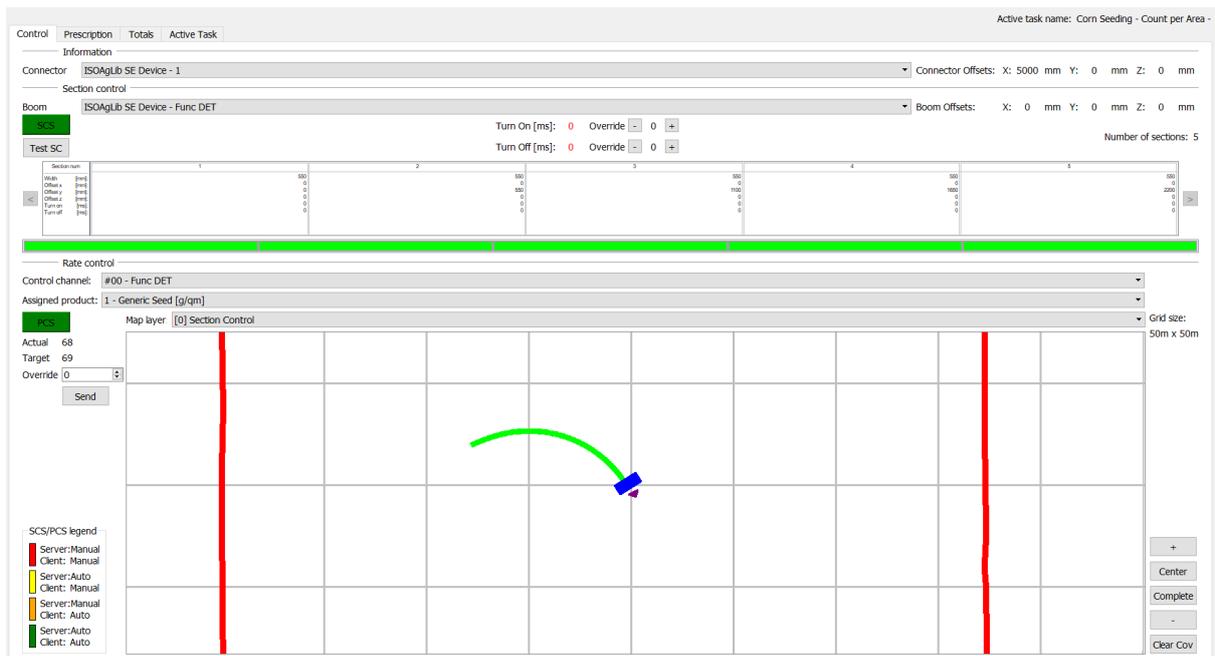


Figura 31: Simulador de Controlador de Tareas para prototipo final con 5 surcos en funcionamiento. Los 5 surcos indican en ese instante que deben estar sembrando según el Control de Surcos.

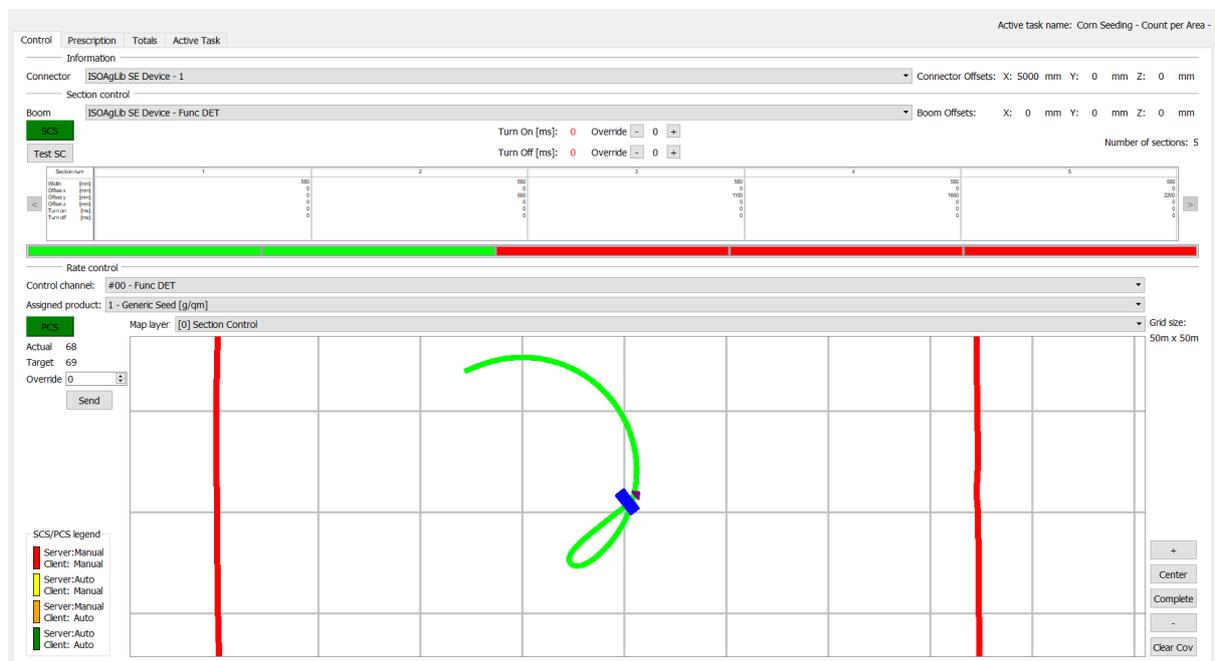


Figura 32: Simulador de Controlador de Tareas para prototipo final con 5 surcos en funcionamiento. 2 surcos indican en ese instante que deben estar sembrando, y los 3 restantes no deben estar sembrando según el Control de Surcos.

Uno de los mayores logros alcanzados fue el desarrollo de una lógica de control robusta y flexible para gestionar el Controlador de Tareas en un entorno con múltiples nodos. Esta lógica permitió una gestión eficiente y centralizada de cada cuerpo de siembra, asegurando que el flujo de trabajo se mantuviera óptimo y que las tareas se ejecutaran según los parámetros configurados en la Terminal Virtual.

El sistema demostró la capacidad de establecer comunicación con cada nodo de siembra, permitiendo configurar individualmente parámetros específicos como densidad de semillas o cortes por surco. Se llevaron a cabo pruebas detalladas de calibración, tanto de manera individual como secuencial y simultánea, lo que confirmó la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes escenarios operativos. Además, el Controlador de Tareas mostró un desempeño destacado al gestionar las acciones de corte por surcos, sincronizando los movimientos de los cuerpos de siembra con los comandos generados por el simulador.

La interacción entre los nodos y el sistema central permitió registrar y analizar en tiempo real los datos relacionados con el proceso de siembra. Esto incluyó la documentación precisa de parámetros como la velocidad de operación, la densidad de siembra y los eventos de corte realizados. El sistema también respondió de manera efectiva a cambios en las condiciones simuladas, ajustando automáticamente la densidad de semillas en función de variaciones en la velocidad, o permitiendo modificaciones manuales desde la Terminal Virtual.

En términos de desempeño, los resultados obtenidos validaron la estabilidad y confiabilidad del sistema bajo condiciones de prueba. La implementación de la lógica de control permitió una integración fluida entre los componentes físicos y los simuladores de servicios ISOBUS, garantizando que las interacciones entre la ECU, el Controlador de Tareas y los cuerpos de siembra fueran precisas y consistentes.

Este desarrollo no solo demostró la funcionalidad del sistema para controlar cinco cuerpos de siembra, sino que la lógica implementada y la arquitectura modular permiten escalar el sistema para manejar más nodos o adaptarse a otras aplicaciones agrícolas, fortaleciendo así el potencial del prototipo como una solución adaptable y eficiente para equipos agrícolas modernos.

Funcionalidad clave del Controlador de Tareas

La lógica desarrollada cumple con diversas funciones críticas para la operación del sistema:

Gestión de múltiples nodos:

- La ECU es capaz de identificar, gestionar y sincronizar múltiples nodos de siembra conectados a la red.
- Cada nodo está asociado a un surco específico, y el Controlador de Tareas asegura que las operaciones de siembra se ejecuten correctamente para cada posición.

Control de motores:

- La lógica implementada permite iniciar, pausar y detener los motores eléctricos de cada cuerpo de siembra de manera individual o colectiva.
- Esto asegura que los motores funcionen únicamente cuando sea necesario, reduciendo el consumo energético y el desgaste mecánico.

Documentación automática:

- El sistema registra automáticamente los eventos relacionados con la siembra, como la activación o detención de los motores, la densidad de siembra utilizada, las velocidades de operación, y cualquier ajuste realizado durante el proceso.
- Esta documentación es clave para garantizar la trazabilidad de las operaciones y para realizar análisis posteriores que permitan optimizar el rendimiento del sistema.

Incorporación de calibraciones estáticas:

- Se implementó la posibilidad de realizar calibraciones estáticas para ajustar los parámetros mecánicos y electrónicos de cada nodo sin necesidad de mover físicamente la sembradora.
- Este enfoque no solo ahorra tiempo, sino que también reduce la complejidad del proceso de calibración, permitiendo realizar ajustes de manera precisa antes de iniciar la operación en campo.

Sincronización y comunicación eficiente:

- La lógica desarrollada asegura una comunicación confiable entre la ECU y los nodos. Esto incluye la transmisión de comandos, la recepción de estadísticas de siembra, y la actualización en tiempo real de los estados en la interfaz del usuario.
- Se prioriza la baja latencia y la robustez en la transmisión de datos, incluso en entornos con interferencias.

Conclusiones

El cliente para el cual se desarrolló este proyecto obtuvo un prototipo funcional que le permite controlar múltiples nodos de siembra, abriendo la posibilidad de gestionar los discos de su propia sembradora en futuras implementaciones. Este prototipo fue diseñado para cumplir con el estándar internacional ISOBUS, garantizando la interoperabilidad con diferentes sistemas y equipos agrícolas.

El cliente, antes de este desarrollo, contaba con equipos agrícolas completamente mecánicos, sin ningún tipo de control electrónico. Esto limitaba la precisión, flexibilidad y capacidad de supervisión de las operaciones, ya que los ajustes debían realizarse manualmente, lo que resultaba en procesos más lentos, menos eficientes y propensos a errores.

Con la implementación de este prototipo, se logró un avance significativo al incorporar tecnología electrónica avanzada y conectividad ISOBUS. Estas mejoras permiten automatizar y centralizar el control de la sembradora, optimizando su desempeño en el campo.

El sistema se conecta de manera eficiente a una Terminal Virtual (VT) y a un Controlador de Tareas (TC), permitiendo la sincronización de datos y la gestión centralizada de los implementos agrícolas. Este enfoque asegura que el prototipo no solo sea compatible con otros equipos ISOBUS del mercado, sino que también ofrezca flexibilidad para futuras expansiones y personalizaciones.

Una de las características destacadas del prototipo es la incorporación de una pantalla diseñada a medida, creada específicamente para satisfacer los requerimientos del cliente. Esta pantalla incluye funciones clave, como:

- **Interfaz Intuitiva**
Diseñada pensando en la facilidad de uso, permite a los operadores acceder rápidamente a las configuraciones y supervisar las operaciones de los nodos de siembra en tiempo real.
- **Configuración de Nodos de Siembra**
Permite ajustar parámetros específicos de cada nodo, como la densidad de siembra, la velocidad de rotación de los discos y la sincronización con otras partes de la maquinaria.
- **Monitoreo estadístico**
Ofrece una representación detallada de parámetros estadísticos de cada cuerpo de siembra.
- **Conformidad con ISOBUS**
La pantalla y sus funcionalidades están completamente alineadas con las especificaciones del estándar ISOBUS, lo que garantiza una operación uniforme y confiable con otros equipos compatibles.

El desarrollo de este prototipo representa un avance significativo para el cliente, ya que al reemplazar un sistema completamente mecánico por uno con control electrónico, las máquinas del cliente ahora pueden realizar ajustes automáticos y precisos, mejorando la eficiencia y reduciendo errores operativos.

Además permite gestionar múltiples nodos de siembra desde una única interfaz, simplificando las operaciones y reduciendo el tiempo necesario para ajustes en el campo. Y al adherirse al estándar ISOBUS, el prototipo puede integrarse fácilmente en entornos

agrícolas ya existentes, eliminando barreras de compatibilidad entre diferentes fabricantes. La solución está diseñada para adaptarse a futuros desarrollos, como la implementación de nuevas funcionalidades o la conexión con otros equipos agrícolas.

En resumen, este prototipo no solo proporciona al cliente una herramienta avanzada para el control de su sembradora, sino que también representa una mejora radical frente a los sistemas mecánicos tradicionales.

Trabajo a futuro

Durante el desarrollo de este proyecto, se utilizó un prototipo construido a partir de módulos previamente implementados y empleando kits de desarrollo disponibles en el mercado. Este enfoque permitió avanzar rápidamente en la implementación inicial, validando los conceptos básicos del sistema y estableciendo un marco funcional para las pruebas y evaluaciones. Sin embargo, un trabajo futuro ideal sería diseñar e implementar el hardware de la ECU desde su diseño específico, adaptándolo específicamente a las necesidades del cliente y optimizándolo para su integración con los equipos agrícolas que utiliza. Este proceso permitiría un mayor control sobre las especificaciones técnicas, maximizando la eficiencia y la compatibilidad del sistema.

El desarrollo realizado durante este proyecto no solo permitió establecer un prototipo funcional, sino que también creó las bases necesarias para añadir complejidad y nuevas funcionalidades al sistema en el futuro. La experiencia adquirida al integrar múltiples componentes y desarrollar soluciones de software modulares y escalables ofrece la posibilidad de extender la aplicabilidad del sistema a otras máquinas agrícolas, como pulverizadoras, cosechadoras o fertilizadoras. Este enfoque puede ampliar significativamente el alcance del proyecto, beneficiando a un mayor número de productores y sectores del agro.

Una evolución lógica del sistema incluiría la incorporación de tecnologías más avanzadas, como sensores de diferentes tipos y capacidades de análisis de datos en tiempo real. Estas mejoras podrían facilitar la toma de decisiones en el momento, optimizando el uso de recursos, incrementando la productividad y reduciendo costos operativos. Por ejemplo, integrar algoritmos de aprendizaje automático podría permitir la detección y corrección automática de irregularidades en el proceso de siembra o fertilización.

Además, aunque las pruebas iniciales con simuladores y módulos de desarrollo han sido esenciales para validar la lógica y funcionalidad del sistema, un paso crucial hacia la madurez del proyecto sería realizar pruebas en un entorno real. Esto implicaría evaluar el sistema directamente en una sembradora operativa, enfrentándolo a las condiciones reales del campo, como variaciones en el terreno, cambios climáticos, y otros desafíos físicos que no se pueden simular completamente en un laboratorio. Estas pruebas permitirían no solo ajustar y refinar la ECU y su software, sino también evaluar cómo interactúan todos los componentes del sistema en un entorno dinámico y complejo.

Llevar el sistema a pruebas de campo permitiría identificar áreas de mejora en la robustez del hardware, la precisión de los algoritmos y la durabilidad de los componentes. También proporcionaría datos valiosos sobre la experiencia del usuario, asegurando que la interfaz sea intuitiva y eficiente para los operadores en condiciones de trabajo reales. La integración exitosa de estas pruebas en un entorno físico representaría un avance significativo, consolidando el prototipo como una solución completamente funcional y lista para su implementación comercial.

En resumen, este proyecto no sólo estableció las bases para un sistema avanzado y escalable, sino que también abrió la puerta a futuras oportunidades de innovación y mejora.

Apéndice

Apéndice 1. Protocolo de comunicación

La comunicación entre ECU y nodos es a través de un protocolo desarrollado en conjunto con Aratom utilizando la capa física BUS CAN, la misma que utiliza el protocolo ISOBUS. A continuación, se detalla el protocolo de comunicación y los mensajes de la tabla 1 que representan los tipos de mensajes entre ECU y nodo.

Nombre	Fuente
Seeding Status	ECU
Velocity	ECU
Density	ECU
Configuration	ECU
Mean Deviation	Nodo
Statistics	Nodo
Encoder	Nodo
Is Machine Lifted	Nodo
Address Request	Nodo

Tabla 1: Métodos implementados en el protocolo de comunicación entre ECU y Nodo. Indicando nombre y la fuente del mensaje.

Seeding Status: este tipo de mensaje se envía de forma global indicando el estado del surco, con un 1 para el estado en el que está activo, y 0 para el estado que está inactivo. El estado de cada surco se indica como el valor del bit en la trama de datos según la posición de cada surco. Una vez que el nodo procesa el mensaje, solamente tendrá en cuenta el bit correspondiente a la posición que ocupa en la sembradora. La posición es un dato que recibe de la ECU en el mensaje de tipo *Configuration*. Por ejemplo, si la posición es la 1 dentro de la sembradora, este nodo solamente procesa el bit 1 dentro del paquete de datos.

Con esta configuración, la cantidad de nodos que pueden recibir este tipo de mensajes es de hasta 64, igual al tamaño del paquete bits en la trama de datos. En caso de necesitar una mayor cantidad de nodos en una sembradora, se puede cambiar esta lógica o implementar un mensaje que separe mensajes hasta el nodo 64 y otro para nodos que ocupan posiciones superiores.

Velocity: la velocidad es enviada como un valor de referencia de la velocidad lineal, ya sea capturada por un módulo GPS, o sensores de velocidad con encoders, más un factor de corrección de cada nodo respecto a este valor de referencia, que puede ser útil en el caso de que no todos los surcos se muevan a la misma velocidad. Es decir, si la sembradora está yendo en línea recta, este factor de corrección será igual a cero, y la velocidad de todos los surcos sería la misma. En un caso como el de una curva, no todos los surcos se moverán a la misma velocidad, por lo que el factor de corrección será distinto de cero para estos surcos.

Density: este parámetro se divide entre densidad de grano fino y densidad basada en peso, para los casos de grano fino, fertilizantes y pasturas. Solamente se actualizará en el caso de que haya un cambio en alguno de estos 2 valores.

Configuration: este mensaje tiene el objetivo de indicar al nodo correspondiente múltiples modos de funcionamiento:

- *Tipo de nodo:* que es la combinación de seleccionar entre un cuerpo de siembra, que además tenga posibilidad de procesar estadística a través del sensor de semillas, y también la capacidad leer valores de un encoder. El tipo de nodo puede ser una combinación de estas tres opciones, incluso podría ser solo sensor de semillas, y el nodo no controlaría un motor. Que podría ser útil para, por ejemplo, un caso de emergencia en donde un motor deje de funcionar y ese surco tenga la posibilidad de continuar un control del movimiento del disco de siembra de manera mecánica, y aún pueda procesar estadística.
- *Posición:* este valor indica la posición que ocupa el nodo dentro de la sembradora, que le será útil para los mensajes en los que hay parámetros específicos para cada nodo, como el factor de corrección de velocidad.
- *Modo de operación:* al momento de realizar una calibración, el disco de siembra podría no tener distribuidos de forma uniforme las semillas en sus orificios de salida, por lo que el nodo puede hacer un ajuste inicial que consiste en poner en funcionamiento el motor, previo a sensor semillas, durante el tiempo que tarda en hacer el disco media vuelta para comenzar efectivamente el proceso de calibración.
- *Identificador:* inicialmente cada nodo no sabe qué dirección se le va a asignar dentro de la red CAN. Este parámetro se utiliza para comunicarse con un nodo que pueda asociar este valor con su propio identificador, que es único dentro de la sembradora. Es decir que este mensaje es considerado como uno de tipo global dentro de la red, pero que será procesado únicamente por el nodo correspondiente.

Mean Deviation: existen dos parámetros que son importantes como telemetría de cada surco, la media y el desvío estándar, que permiten tener una mejor idea de la efectividad que tiene cada surco al comparar con valores de densidad objetivo.

- *Mean:* debido a que cada nodo no sabe la distribución de todos los surcos de la sembradora, el valor que reporta como valor medio, es la distancia lineal entre semillas. La ECU recibe este valor para procesarlo como un valor de densidad media o densidad aplicada en semillas/hectárea.
- *Deviation:* el valor del desvío estándar de la distancia lineal entre semillas del surco.

Statistics: este tipo de mensajes también posee parámetros estadísticos útiles para el análisis de la siembra o calibración, y su posterior procesamiento y corrección en caso de ser necesario.

- *Quality:* Este campo representa la Calidad de Siembra 'A' a la que está sembrando el nodo cabezal.
- *Doubles:* Este campo representa la cantidad de Dobles 'D' a la que está sembrando el nodo cabezal.

- *Missing*: Este campo representa la cantidad de Faltantes 'M' a la que está sembrando el nodo cabezal.
- *Coefficient of Variation*: Este campo representa el Coeficiente de Variación 'CV' a la que está sembrando el nodo cabezal.

Encoder: en caso de haber configurado un nodo con Encoder, se recibirá un mensaje periódicamente con el valor de velocidad lineal reportado por el nodo en m/s.

Is Machine Lifted: la sembradora en su totalidad tienen 2 posiciones a grandes rasgos, levantada o no levantada. La primera se utiliza generalmente cuando se desea mover la sembradora hasta el lugar de inicio de la siembra, o luego de terminar con el proceso y se desea guardar. En ese caso no es deseado que las partes mecánicas del surco de siembra estén tocando el suelo, y la ECU debe conocer este estado para procesar el estado de la siembra y reportarlo a los nodos.

Si la sembradora no está levantada, es decir que está clavada en el suelo, la ECU puede realizar el procesamiento conociendo este estado, que no necesariamente significa que los surcos deben estar sembrando, ya que depende de otras variables, pero el estado del sensor de clavado es un factor clave a tener en cuenta al momento de reportar el estado de siembra a los nodos.

Address Request: cuando no tiene definida una configuración, envía periódicamente este mensaje con su identificador único dentro de la trama, hasta que la ECU responde con un mensaje de tipo *Configuration*.

Apéndice 2. Pantallas desarrolladas para prototipo final

En esta sección se presentan las pantallas diseñadas para el diseño final del dispositivo que hacen de interfaz para el usuario a través de la Terminal Virtual.

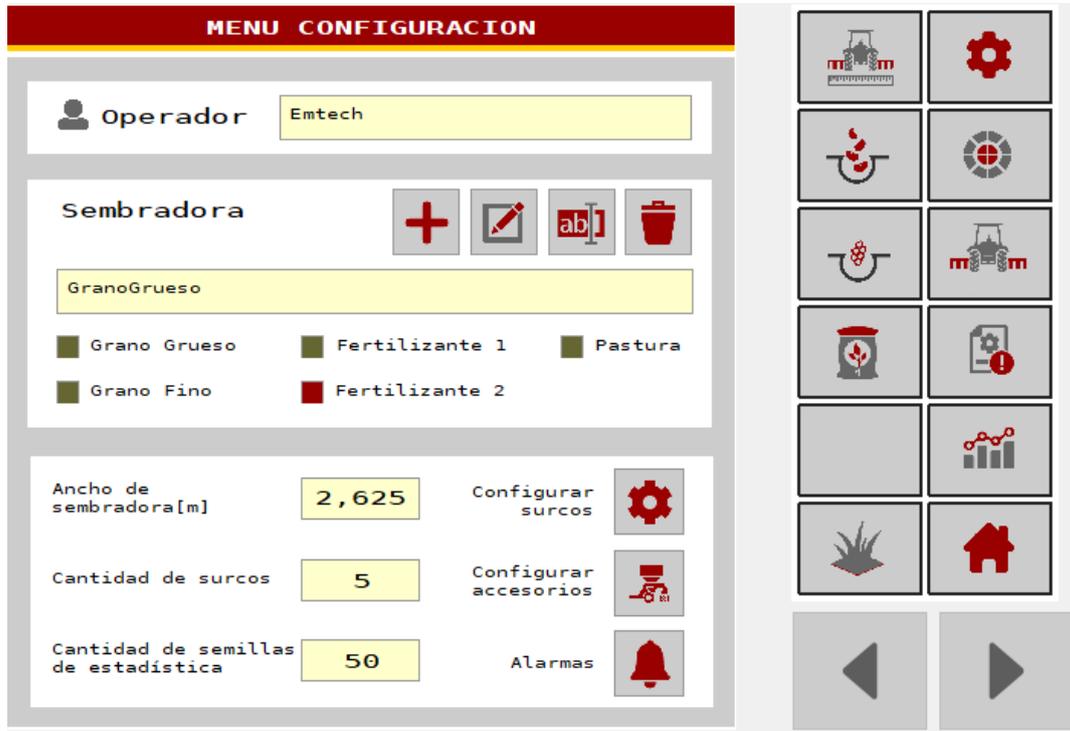


Figura 33: Pantalla de configuración general ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

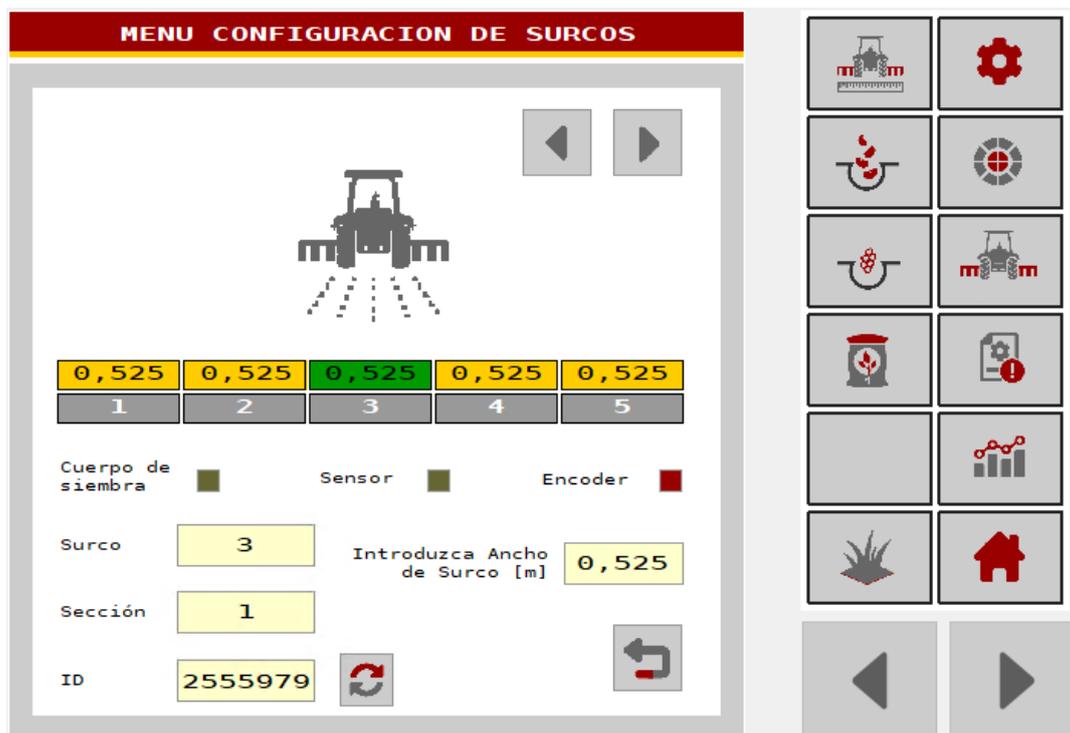


Figura 34: Pantalla de configuración de surcos ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.



Figura 35: Pantalla de configuración de alarmas ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

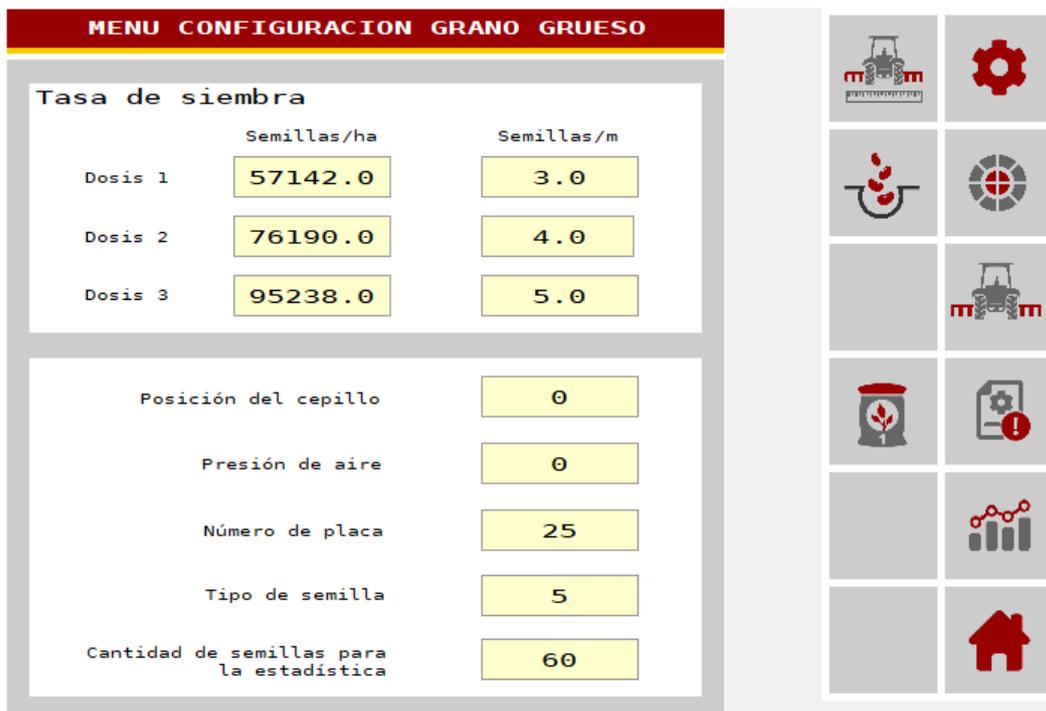


Figura 36: Pantalla de configuración de siembra de grano grueso ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

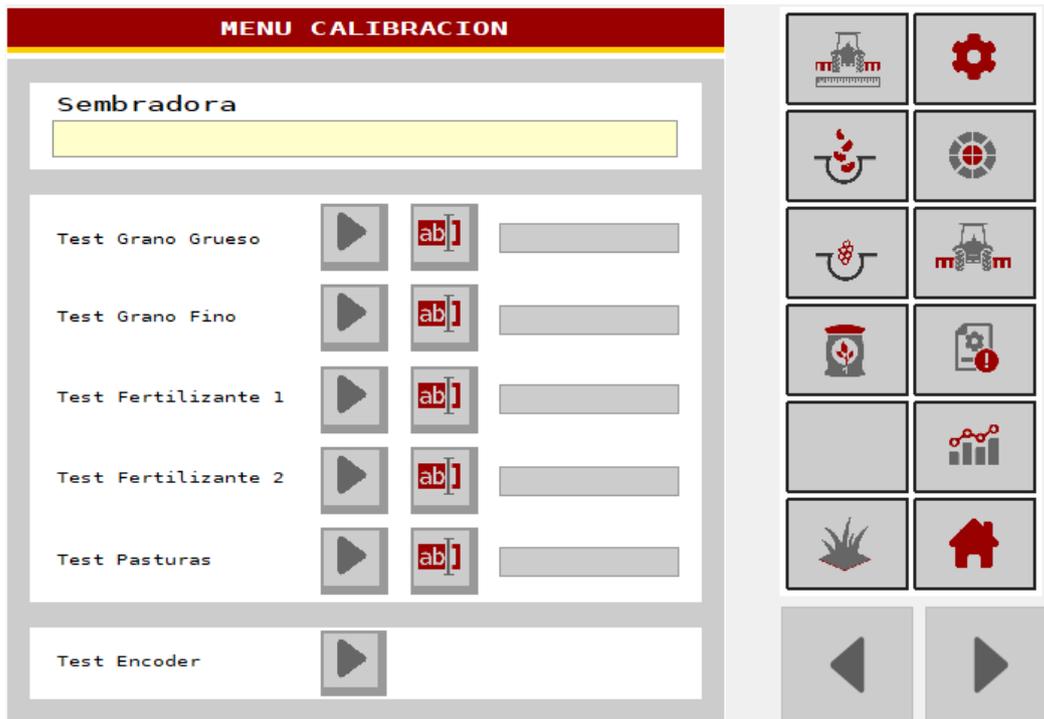


Figura 37: Pantalla general de Calibración ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.



Figura 38: Pantalla de Calibración de grano grueso ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

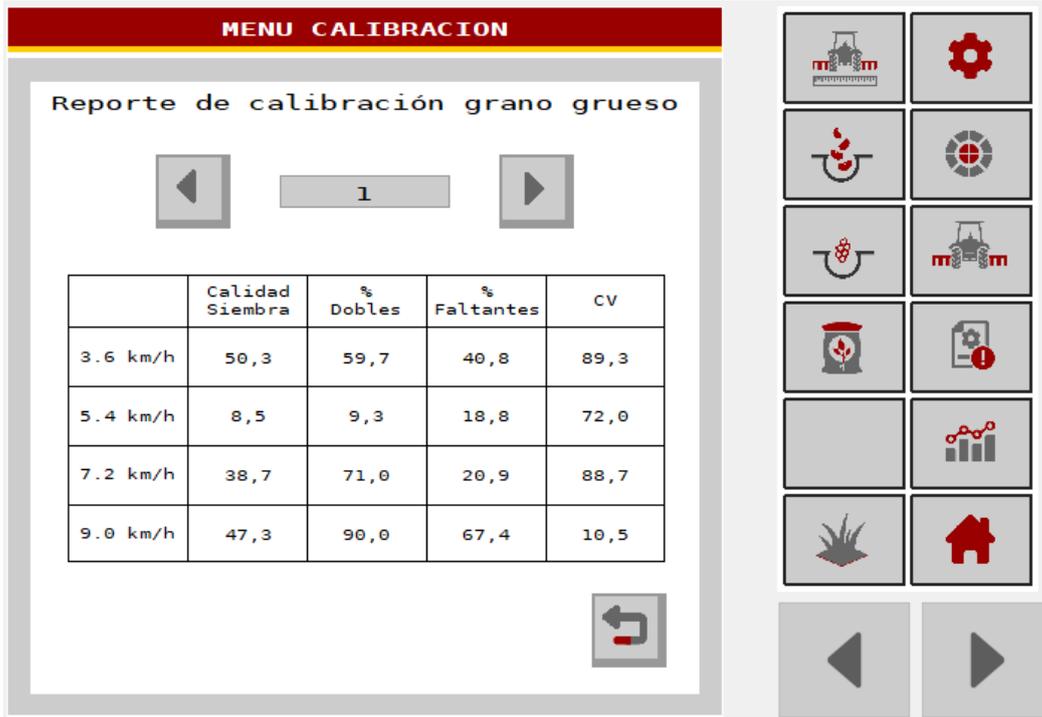


Figura 39: Pantalla de reporte de Calibración de grano grueso ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

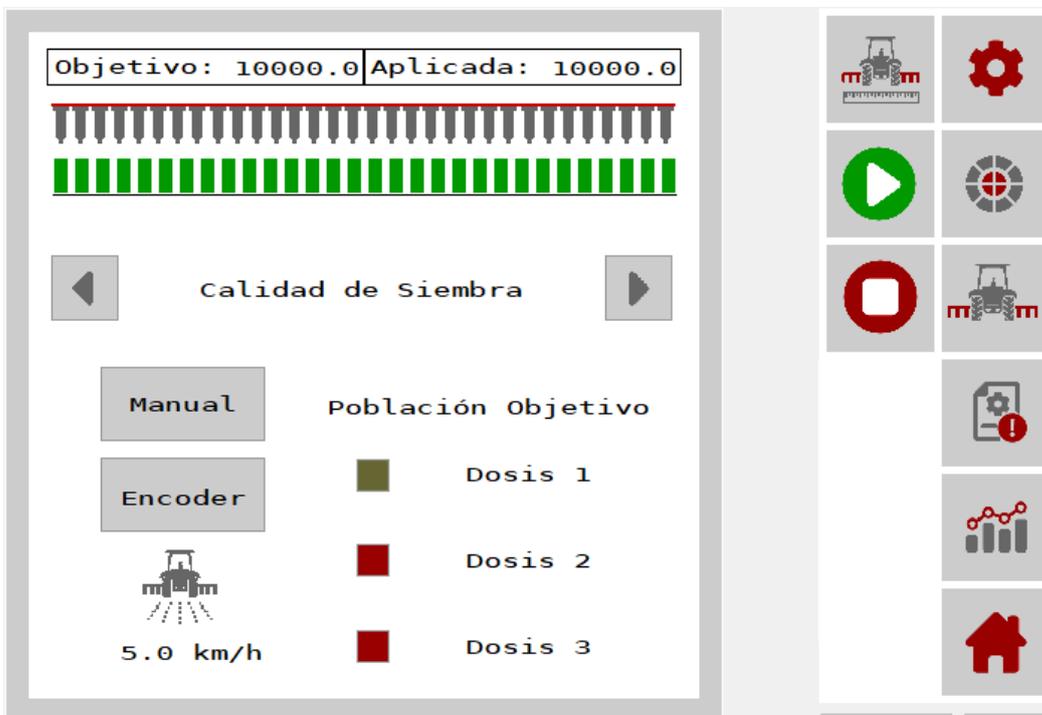


Figura 40: Pantalla de Trabajo ejecutando desde la ECU, visualizada en el simulador.

Bibliografía y referencias

1. Agri-Motion. "¿Qué es un sistema ISOBUS y cómo funciona?" <https://www.agri-motion.com/es/noticias/posts/que-es-un-sistema-isobus-y-como-funciona>
2. Agrotech Campus. "La comunicación entre el tractor y el apero gracias a la Tecnología ISOBUS." <https://agrotechcampus.com/blog/la-comunicacion-tractor-y-el-apero-por-tecnologia-isobus>
3. Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF). <https://www.aef-online.org/>
4. Nucleo-F767zi. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f767zi.html>
5. PCAN-USB. <https://www.peak-system.com/PCAN-USB.199.0.html?L=1>
6. Transceptor CAN. <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp2551>
7. Librería ISOBUS utilizada <https://osb-connagtive.com/en/isobus/leistungen/software/isoaglibse/>