



# Proyecto final de Ingeniería Electrónica

Vehículo autónomo guiado (AGV) para transporte de  
cargas ligeras en ambientes industriales

**Autores:** Kipen, Javier (57.345)  
Brito Devoto, Marcos (56.389)  
Goytía, Agustín (56.023)  
Milhas, Sebastián (55.198)

**Tutores:** Nemirovsky, Nicolás  
Orchessi, Walter  
Pingitore, Ricardo  
Ugarte, Alejandro

**Fecha:** 23/02/2021

## 1. Agradecimientos

A nuestras familias, que nos enseñaron el valor del esfuerzo y la educación, y nos apoyaron en todo nuestro crecimiento.

A nuestras parejas, que nos acompañaron en el proceso y supieron entender las ausencias debido al trabajo.

A nuestros amigos, por apoyarnos incondicionalmente.

A los docentes y al Departamento de Electrónica, por la enseñanza que brindan y el concepto de compañerismo que nos inspiraron en estos años de carrera.

## 2. Índice

### 2.1. Contenidos

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Agradecimientos .....                              | 2  |
| 2.     | Índice.....  | 3  |
| 2.1.   | Contenidos .....                                   | 3  |
| 2.2.   | Lista de Figuras.....                              | 7  |
| 2.3.   | Lista de Tablas.....                               | 10 |
| 3.     | Acrónimos y Definiciones.....                      | 12 |
| 4.     | Resumen .....                                      | 15 |
| 5.     | Introducción.....                                  | 16 |
| 5.1.   | Antecedentes .....                                 | 16 |
| 5.2.   | Contexto del proyecto.....                         | 17 |
| 6.     | Objetivos .....                                    | 18 |
| 6.1.   | Finalidad del proyecto.....                        | 18 |
| 6.2.   | Planteamiento del problema por resolver .....      | 18 |
| 6.3.   | Alcance .....                                      | 18 |
| 7.     | Definición de Producto .....                       | 19 |
| 7.1.   | Casa de calidad.....                               | 19 |
| 7.2.   | Requerimientos de Cliente.....                     | 20 |
| 7.2.1. | Requerimientos finales para trazabilidad.....      | 20 |
| 7.3.   | Diagrama Funcional de Interfaces.....              | 26 |
| 7.4.   | Especificaciones de Diseño.....                    | 26 |
| 7.4.1. | Especificaciones Funcionales.....                  | 26 |
| 7.4.2. | Especificaciones de Interfaz .....                 | 28 |
| 7.4.3. | Especificaciones de Performance .....              | 30 |
| 7.4.4. | Especificaciones de Implementación .....           | 31 |
| 7.4.5. | Especificaciones de Servicio ( <i>RAMS</i> ) ..... | 32 |
| 8.     | Plan de Validación .....                           | 34 |
| 8.1.   | Diseño de Bancos de Pruebas .....                  | 34 |
| 8.1.1. | Banco de pruebas de características físicas.....   | 34 |
| 8.1.2. | Banco de pruebas estáticas .....                   | 34 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 8.1.3.  | Banco de pruebas de movimiento.....  | 35  |
| 8.1.4.  | Banco de pruebas sobre una trayectoria.....                                      | 35  |
| 8.1.5.  | Banco de pruebas de misiones.....  | 37  |
| 8.2.    | Especificaciones de ensayos.....   | 38  |
| 8.3.    | Matriz de Trazabilidad de Validación.....  | 50  |
| 9.      | Análisis de Factibilidad.....  | 53  |
| 9.1.    | Factibilidad tecnológica.....  | 53  |
| 9.1.1.  | Esquema modular.....   | 53  |
| 9.1.2.  | Propuesta de alternativas de diseño.....   | 53  |
| 9.1.3.  | Elección de una solución.....  | 64  |
| 9.1.4.  | DFMEA.....   | 69  |
| 9.2.    | Factibilidad de tiempos.....   | 69  |
| 9.2.1.  | Planificación (PERT).....  | 70  |
| 9.2.2.  | Programación (Gantt).....  | 71  |
| 9.3.    | Factibilidad económica. (Mercado, costos, ciclo de vida, VAN, TIR).....          | 74  |
| 9.3.1.  | Modelo de Negocios.....  | 74  |
| 9.3.2.  | Costos.....  | 75  |
| 9.3.3.  | Ingresos.....  | 77  |
| 9.3.4.  | Cuadro de resultados y rendimiento.....  | 78  |
| 9.4.    | Factibilidad legal y responsabilidad civil (regulaciones y licencias).....       | 80  |
| 9.4.1.  | Sociedad Anónima Simplificada.....   | 80  |
| 9.4.2.  | Resolución 171/16 - Seguridad Eléctrica.....                                     | 81  |
| 9.4.3.  | Seguridad e higiene en el trabajo (Decreto 911/96).....                          | 82  |
| 10.     | Ingeniería de detalle.....   | 84  |
| 10.1.   | Hardware.....  | 84  |
| 10.1.1. | Diagrama de bloques (hardware).....  | 84  |
| 10.1.2. | Descripción detallada de cada bloque.....  | 84  |
| 10.1.3. | Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales de cada bloque..... | 88  |
| 10.1.4. | Plan de pruebas de cada módulo.....  | 100 |
| 10.2.   | Software.....  | 103 |
| 10.2.1. | Estructura general de cada módulo.....   | 103 |
| 10.2.2. | Diagramas de estados y flujogramas.....  | 110 |
| 10.2.3. | Descripción detallada del software.....  | 119 |
| 10.2.4. | Plan de prueba de módulos y de depuración de Software.....                       | 135 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 11.      | Construcción de prototipo.....                                     | 139 |
| 11.1.    | Consideraciones del prototipo.....                                 | 139 |
| 11.1.1.  | Llave termomagnética.....  | 139 |
| 11.1.2.  | Batería.....   | 139 |
| 11.1.3.  | Motores.....   | 139 |
| 11.1.4.  | Controladores de motor.....  | 141 |
| 11.2.    | Diseño de los circuitos.....                                       | 142 |
| 11.2.1.  | Sensor de velocidad.....   | 142 |
| 11.2.2.  | Controladores de motor.....  | 143 |
| 11.2.3.  | Circuito de seguridad.....   | 143 |
| 11.2.4.  | Sensor de camino y placa de comunicación.....                      | 144 |
| 11.3.    | Diseño mecánico.....   | 145 |
| 11.3.1.  | Estructura general.....  | 147 |
| 11.3.2.  | Detalles del módulo de tracción.....                               | 150 |
| 11.3.3.  | Sensores de velocidad de los motores.....                          | 151 |
| 11.4.    | Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje..... | 152 |
| 11.5.    | Análisis del diseño.....   | 154 |
| 12.      | Validación de prototipo.....                                       | 155 |
| 12.1.    | Resultados.....  | 155 |
| 12.1.1.  | Estructura del vehículo.....                                       | 155 |
| 12.1.2.  | Comunicación a través de <i>Wi-Fi</i> .....                        | 155 |
| 12.1.3.  | Funcionamiento de la interfaz de diagnóstico.....                  | 155 |
| 12.1.4.  | Monitoreo de batería.....  | 155 |
| 12.1.5.  | Comprobación de velocidad de movimiento.....                       | 155 |
| 12.1.6.  | Modo manual.....   | 155 |
| 12.1.7.  | Traslado estable de carga estipulada.....                          | 156 |
| 12.1.8.  | Tiempo de establecimiento a velocidad máxima con carga máxima..... | 156 |
| 12.1.9.  | Seguimiento de la trayectoria con carga.....                       | 156 |
| 12.1.10. | Frenado ante pérdida de referencia de trayectoria.....             | 157 |
| 12.1.11. | Autonomía.....   | 157 |
| 12.1.12. | Verificación de funcionamiento en misión simple.....               | 157 |
| 12.1.13. | Manejo de eventos de emergencia, pausa y aborto en la misión.....  | 157 |
| 12.1.14. | Verificación de funcionamiento en misión compleja.....             | 157 |
| 12.2.    | Consideraciones finales hacia el producto final.....               | 157 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 12.3.   | Estudios de confiabilidad de hardware y de software ..... | 158 |
| 12.3.1. | Confiabilidad de hardware .....                           | 158 |
| 12.3.2. | Confiabilidad de software.....                            | 164 |
| 12.3.3. | Confiabilidad del dispositivo.....                        | 167 |
| 13.     | Conclusiones.....   | 168 |
| 13.1.   | Cumplimiento de Objetivos.....                            | 168 |
| 13.2.   | Lecciones aprendidas .....                                | 168 |
| 13.3.   | Recomendaciones para futuros diseños .....                | 168 |
| 14.     | Bibliografía.....   | 170 |
| 15.     | Anexos Técnicos .....                                     | 172 |
| 15.1.   | Esquemáticos .....  | 172 |
| 15.2.   | Planos del diseño mecánico .....                          | 175 |
| 15.3.   | Notas de aplicación .....                                 | 176 |
| 15.4.   | Códigos de Software .....                                 | 176 |

## 2.2. Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 7-1 Casa de calidad .....                            | 19 |
| Figura 7-2 Diagrama de interfaces.....                      | 26 |
| Figura 8-1 Banco de pruebas de características físicas..... | 34 |
| Figura 8-2 Banco de pruebas estáticas .....                 | 35 |
| Figura 8-3 Banco de pruebas de movimiento.....              | 35 |
| Figura 8-4 Trayectoria para las pruebas .....               | 36 |
| Figura 8-5 Banco de pruebas sobre trayectoria.....          | 37 |
| Figura 8-6 Trayectoria con estaciones para pruebas.....     | 37 |
| Figura 8-7 Banco de pruebas para misiones.....              | 38 |
| Figura 8-8 Diagrama PERT de ensayos de validación.....      | 50 |
| Figura 9-1 Diagrama modular .....                           | 53 |
| Figura 9-2 Topologías de construcción .....                 | 57 |
| Figura 9-3 Física del AGV [4] .....                         | 59 |
| Figura 9-4 Error en la trayectoria del camino [4].....      | 60 |
| Figura 9-5 Eventos de trayectoria [5] .....                 | 60 |
| Figura 9-6 Lazos de control.....                            | 61 |
| Figura 9-7 Trayectoria del camino .....                     | 66 |
| Figura 9-8 Topología seleccionada .....                     | 67 |
| Figura 9-9 DFMEA de diseño modular .....                    | 69 |
| Figura 9-10 Diagrama temporal general.....                  | 70 |
| Figura 9-11 Planificación PERT.....                         | 70 |
| Figura 9-12 Elección del HW a utilizar .....                | 72 |
| Figura 9-13 Obtención y prueba de material.....             | 72 |
| Figura 9-14 Desarrollo de Software y Hardware .....         | 73 |
| Figura 9-15 Pruebas modulares y validación .....            | 73 |
| Figura 10-1 Diagrama modular de Hardware .....              | 84 |
| Figura 10-2 CIAA-NXP .....                                  | 89 |
| Figura 10-3 Módulo ESP para comunicaciones.....             | 90 |
| Figura 10-4 Conversor TTL a RS-232 .....                    | 90 |
| Figura 10-5 Conectores macho y hembra DB-9 RS-232.....      | 90 |
| Figura 10-6 OpenMV H7 .....                                 | 91 |
| Figura 10-7 Conversor TTL a RS-485 .....                    | 91 |
| Figura 10-8 Llave termomagnética .....                      | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 10-9 Pulsador de emergencia .....                                    | 93  |
| Figura 10-10 Pulsador de accionamiento .....                                | 94  |
| Figura 10-11 Luces de señalización.....                                     | 94  |
| Figura 10-12 Motor a utilizar .....   | 96  |
| Figura 10-13 Curva de torque en función de RPM. ....                        | 97  |
| Figura 10-14 Motor con encoder de acople trasero y con disco ranurado. .... | 98  |
| Figura 10-15 Sensor óptico utilizado para el encoder .....                  | 98  |
| Figura 10-16 Diagrama modular de software .....                             | 103 |
| Figura 10-17 Diagrama en bloques del centro de comunicaciones .....         | 104 |
| Figura 10-18 Diagrama en bloques del centro de control .....                | 105 |
| Figura 10-19 Diagrama en bloques del control de trayectoria .....           | 106 |
| Figura 10-20 Diagrama en bloques del control de movimiento .....            | 108 |
| Figura 10-21 Diagrama en bloques del HMI. ....                              | 109 |
| Figura 10-22 Diagrama en bloques del procesamiento de camino. ....          | 110 |
| Figura 10-23 Flujograma del código en el ESP .....                          | 111 |
| Figura 10-24 Flujograma de recepción de mensajes .....                      | 112 |
| Figura 10-25 Flujograma de envío de mensajes .....                          | 112 |
| Figura 10-26 Diagrama de estados del centro de control. ....                | 113 |
| Figura 10-27 Diagrama de estados de centro de trayectoria. ....             | 115 |
| Figura 10-28 Diagrama de flujo de tarea de misión.....                      | 116 |
| Figura 10-29 Diagrama de flujo de rutina de medición de OpenMV. ....        | 117 |
| Figura 10-30 Máquina de estados de detección de bifurcaciones. ....         | 118 |
| Figura 10-31 Diagrama de flujo del control de movimiento.....               | 119 |
| Figura 10-32 Diagrama general de archivos .....                             | 120 |
| Figura 10-33 Estructura ilustrativa de la red de AGVs .....                 | 123 |
| Figura 10-34 Tag utilizado para identificar estaciones .....                | 127 |
| Figura 10-35 Ejemplo de estructura de las misiones .....                    | 131 |
| Figura 10-36 Captura de página principal de interfaz al usuario .....       | 133 |
| Figura 10-37 Pestaña de Log .....   | 134 |
| Figura 10-38 Pestaña de detalles de misión .....                            | 135 |
| Figura 10-39 Emulador de AGV para pruebas de aplicación de control .....    | 137 |
| Figura 11-1: Gato eléctrico para auto .....                                 | 140 |
| Figura 11-2 Controlador de motor.....                                       | 142 |
| Figura 11-3: Esquemático del circuito de encoders.....                      | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 11-4 Esquemático de conexión para el controlador ..... | 143 |
| Figura 11-5 Esquemático de la placa de seguridad.....         | 144 |
| Figura 11-6 Esquemático de conexión RS485 / OpenMV .....      | 145 |
| Figura 11-7 Esquemático de conexión ESP-8266 / RS232 .....    | 145 |
| Figura 11-8 Diseño final de la estructura en CAD. ....        | 147 |
| Figura 11-9 Módulo de estructura externa.....                 | 149 |
| Figura 11-10 Módulo de tracción. ....                         | 149 |
| Figura 11-11 Vista inferior del módulo de tracción. ....      | 150 |
| Figura 11-12 Soportes de eje UCP201. ....                     | 151 |
| Figura 11-13 Disco ranurado y soporte de encoder. ....        | 152 |
| Figura 11-14 Montaje del sensor de velocidad.....             | 152 |
| Figura 11-15 Vista explosionada módulo de tracción.....       | 153 |
| Figura 11-16 Vista explosionada AGV. ....                     | 153 |
| Figura 12-1 Tiempo de establecimiento del vehículo .....      | 156 |
| Figura 12-2 RBD global del AGV.....                           | 158 |
| Figura 12-3 Confiabilidad en el tiempo.....                   | 164 |
| Figura 15-1 Esquemático general del AGV.....                  | 172 |
| Figura 15-2 Esquemático del controlador de los motores.....   | 173 |
| Figura 15-3 Esquemático de la interfaz de usuario.....        | 173 |
| Figura 15-4 Esquemático de conexión de los encoders.....      | 174 |
| Figura 15-5 Esquemático de conexión de la CIAA.....           | 174 |
| Figura 15-6 Plano mecánico de la estructura .....             | 175 |
| Figura 15-7 Plano mecánico del módulo de tracción .....       | 176 |

### 2.3. Lista de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3-1 Acrónimos .....                                 | 13 |
| Tabla 3-2 Definiciones .....                              | 14 |
| Tabla 7-1 Requerimientos originales del proyecto .....    | 23 |
| Tabla 7-2 Requerimientos modificados. ....                | 25 |
| Tabla 7-3 Leyenda de uso en especificaciones .....        | 26 |
| Tabla 7-4: Especificaciones Funcionales .....             | 27 |
| Tabla 7-5 Especificaciones de Interfaz MEC1 .....         | 28 |
| Tabla 7-6 Especificaciones de interfaz MEC2.....          | 28 |
| Tabla 7-7 Especificaciones de interfaz DAT1 .....         | 28 |
| Tabla 7-8 Especificaciones de interfaz TAB.....           | 29 |
| Tabla 7-9 Especificaciones de interfaz SEN.....           | 29 |
| Tabla 7-10 Especificaciones de interfaz DIA .....         | 30 |
| Tabla 7-11 Especificaciones de performance .....          | 30 |
| Tabla 7-12 Especificaciones de Operación.....             | 31 |
| Tabla 7-13 Especificaciones dimensionales y de peso ..... | 31 |
| Tabla 7-14 Especificaciones de costo.....                 | 31 |
| Tabla 7-15 Especificaciones de seguridad .....            | 32 |
| Tabla 7-16 Especificaciones de disponibilidad.....        | 32 |
| Tabla 7-17 Especificaciones de confiabilidad.....         | 33 |
| Tabla 7-18 Especificaciones de mantenibilidad .....       | 33 |
| Tabla 9-1 Tipos de redes inalámbricas.....                | 55 |
| Tabla 9-2 Alternativas tecnológicas de motores .....      | 57 |
| Tabla 9-3 Tecnologías de motores .....                    | 58 |
| Tabla 9-4 Sensor de camino.....                           | 62 |
| Tabla 9-5 Comparación de tipos de baterías. [6] [7] ..... | 64 |
| Tabla 9-6 Definición de tareas .....                      | 71 |
| Tabla 9-7 Costos de materiales.....                       | 75 |
| Tabla 9-8 Inversión inicial del proyecto .....            | 76 |
| Tabla 9-9 Gastos fijos del proyecto.....                  | 77 |
| Tabla 9-10 Gastos variables del proyecto.....             | 77 |
| Tabla 9-11 Cuadro de resultados (Años 1-5) .....          | 78 |
| Tabla 9-12 Cuadro de resultados (Años 6-10) .....         | 78 |
| Tabla 9-13 Flujo de fondos (Años 0-5) .....               | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 9-14 Flujo de fondos (Año 6-10).....                         | 79  |
| Tabla 10-1 Factores para el cálculo de motores. ....               | 96  |
| Tabla 10-2 Eventos globales .....                                  | 121 |
| Tabla 10-3 Definición de acrónimos para los módulos.....           | 122 |
| Tabla 10-4 Mensajes que envía el AGV.....                          | 124 |
| Tabla 10-5 Mensajes enviados por el centro de comandos .....       | 125 |
| Tabla 10-6 Formato mensajes OpenMV .....                           | 126 |
| Tabla 10-7 Porcentajes de carga de batería según su tensión .....  | 137 |
| Tabla 12-1 Confiabilidad de Interruptor termomagnético .....       | 159 |
| Tabla 12-2 Confiabilidad de CIAA.....                              | 159 |
| Tabla 12-3 Confiabilidad de placa de centro de comunicaciones..... | 160 |
| Tabla 12-4 Confiabilidad de placa de sensado de camino .....       | 161 |
| Tabla 12-5 Confiabilidad de encoders .....                         | 162 |
| Tabla 12-6 Confiabilidad de controlador de motor .....             | 162 |
| Tabla 12-7 Confiabilidad de motores.....                           | 163 |
| Tabla 12-8 Estimación de confiabilidad de software .....           | 167 |

### 3. Acrónimos y Definiciones

| <b>Acrónimo</b> | <b>Detalle</b>   |
|-----------------|--|
| <b>3D</b>       | 3-Dimensiones  |
| <b>AC</b>       | Corriente alterna  |
| <b>AGV</b>      | Vehículo autónomo guiado   |
| <b>ANSI</b>     | Instituto Nacional Estadounidense de Estándares                                      |
| <b>BLDC</b>     | Motor de tensión directa sin escobillas  |
| <b>BMS</b>      | Sistema de administración de batería   |
| <b>BU</b>       | Bienes de uso  |
| <b>CAD</b>      | Diseño asistido por computadora  |
| <b>CIAA</b>     | Computadora industrial abierta argentina   |
| <b>DC</b>       | Corriente directa  |
| <b>DMIPS</b>    | Millones de instrucciones por segundo del tipo Dhrystone                             |
| <b>DUT</b>      | Dispositivo sometido a ensayo  |
| <b>EBIT</b>     | Ganancias antes de intereses e impuestos   |
| <b>EBITDA</b>   | Ganancias antes de intereses, impuestos, amortizaciones y depreciaciones             |
| <b>FDM</b>      | Fabricación por filamento fundido  |
| <b>FF</b>       | Flujo de fondos  |
| <b>FreeRTOS</b> | Sistema operativo en tiempo real libre   |
| <b>GPIOs</b>    | Hace referencia a los pines (conectores) de propósito general de un microprocesador. |
| <b>IG</b>       | Impuesto a las ganancias   |
| <b>IVA</b>      | Impuesto al valor agregado   |
| <b>IIBB</b>     | Ingresos brutos  |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>KT</b>    | Capital de trabajo                           |
| <b>LIDAR</b> | Detección y rango de imágenes láser          |
| <b>LiPo</b>  | Batería de Litio Polímero                    |
| <b>MQTT</b>  | Protocolo de envío de mensajes de telemetría |
| <b>MTTF</b>  | Tiempo medio hasta la falla                  |
| <b>NiCd</b>  | Batería de Níquel Cadmio                     |
| <b>NiMH</b>  | Batería de Níquel Manganeso                  |
| <b>PATM</b>  | Presión atmosférica                          |
| <b>PCB</b>   | Circuito impreso en placa                    |
| <b>PD</b>    | Control proporcional derivativo              |
| <b>PID</b>   | Control proporcional integrativo derivativo  |
| <b>PWM</b>   | Modulación de ancho de pulso                 |
| <b>RH</b>    | Recursos humanos                             |
| <b>SLOC</b>  | Líneas de código fuente                      |
| <b>TIR</b>   | Tasa interna de retorno                      |
| <b>TREMA</b> | Tasa de rendimiento mínima aceptable         |
| <b>VAN</b>   | Valor actual neto                            |

*Tabla 3-1 Acrónimos*

| Palabra           | Definición  |
|-------------------|---|
| <b>Broker</b>     | Bloque de la red MQTT cuya función es la de distribuir los mensajes de la red   |
| <b>Bumper</b>     | Parachoques frontal   |
| <b>Checkpoint</b> | Se llaman <i>checkpoints</i> a los puntos característicos del camino a seguir por el AGV, como por ejemplo bifurcaciones y <i>tags</i> .        |
| <b>Commit</b>     | Versión de archivos dentro de un sistema de control de versiones.   |
| <b>Debugger</b>   | Interfaz que permite inspeccionar el código durante la ejecución, cuya utilidad reside en sus herramientas para encontrar errores en el código. |
| <b>Encoder</b>    | Dispositivo electromecánico que convierte posición angular de un eje a una señal electrónica.   |
| <b>Firmware</b>   | Programa que tiene una interacción directa con el hardware, generalmente inalterable  |
| <b>Hardware</b>   | Partes tangibles de un sistema informático o electrónico.   |
| <b>Header</b>     | Se refiere al encabezado enviado por las partes de la red en sus mensajes.  |
| <b>Setpoint</b>   | Objetivo fijado sobre una variable que se busca controlar.  |
| <b>Stepper</b>    | Motor de tipo paso a paso.  |

Tabla 3-2 Definiciones

## 4. Resumen

El siguiente informe constituye la documentación de un proyecto final de la carrera Ingeniería Electrónica. El proyecto consiste en el diseño de un Automated Guided Vehicle (AGV), para el transporte de cargas ligeras dentro de una planta industrial.

Este proyecto surgió a pedido de un cliente, una empresa que brinda soluciones de ingeniería a otras empresas. En un principio, el objetivo propuesto era fabricar un AGV modular que lleve cargas de peso mediano en un ambiente industrial, contando con el soporte económico del cliente para la compra de los materiales. Desafortunadamente, ocurrió la pandemia COVID-19 y la empresa se desvinculó del proyecto. Esto llevó a reestructurarlo para el transporte de cargas ligeras dado que la financiación pasó a ser un factor limitante. Sin embargo, se procuró que el diseño sea fácilmente escalable a cargas mayores.

Sobre esta idea se realizó un estudio de diseño que incluyó una investigación de las diferentes tecnologías existentes de AGVs para así alcanzar la solución que más se ajusta a lo planteado. Luego, se diseñaron los distintos bancos de pruebas necesarios para garantizar las especificaciones del producto y se realizaron diversas variantes de análisis de factibilidad. Por un lado, se encuentran los análisis de factibilidad tecnológica y factibilidad de tiempos que contribuyen a la parte técnica y de realización del proyecto. Por otro lado, se cuenta con un análisis de factibilidad económica y legal, los cuales contribuyen a la cuestión práctica y de proyección empresarial. Posteriormente, se realizó una selección del hardware de la unidad a producir, analizando las alternativas presentes en el mercado y, una vez hallada una solución, se realizaron las pruebas pertinentes para cada módulo. Asimismo, fue necesario establecer el mejor plan de acción para abordar el diseño del software, el cual se desarrolló en base a un esquema modular por bloques y también fue sometido a una evaluación de funcionamiento una vez finalizado.

Finalmente, el prototipo diseñado se construyó y es completamente funcional. Sobre este se ejecutaron los ensayos de validación, obteniendo así resultados sobre el funcionamiento que corroboran el cumplimiento de los requerimientos y especificaciones propuestos, y por ende el éxito del proyecto en cuestión.

## 5. Introducción

Las empresas de manufactura se encuentran constantemente en busca de maneras más eficientes y económicas de llevar a cabo los procesos dentro de una planta. Una línea de producción tradicional consiste en un proceso secuencial, dividido en etapas altamente especializadas para su tarea y donde en cada etapa se ejecuta una acción sobre el producto antes de pasar a la siguiente. Una alternativa a este método es incorporar una línea flexible, la cual permite producir más de un producto, cambiar el sistema sin afectar la producción completa y mejorar sus capacidades de procesamiento.

Sin embargo, una configuración semejante requiere el transporte de materia prima y productos semielaborados entre distintas líneas de producción dentro de la planta. Esto requiere personal dedicado a esta tarea que cumpla con un ritmo de trabajo estricto, ya que un atraso en el transporte se puede reflejar en una demora en la línea de producción.

Esta situación dio lugar a los AGV como componentes esenciales dentro de una industria, pues permiten llevar el producto semi elaborado de la etapa actual a la siguiente con un mínimo personal. Además, los sistemas actuales cuentan con sistemas avanzados de seguridad que reducen el riesgo durante el transporte y eliminan el error humano.[1]

### 5.1. Antecedentes

Existen en el mercado una gran variedad de AGVs, con distintas tecnologías, costos y servicios. En la industria argentina hay cada día más empresas que buscan optimizar su producción con estas tecnologías. Sin embargo, estas soluciones suelen estar orientadas a empresas de gran envergadura por su elevado costo inicial. Debido a lo mencionado, existe demanda insatisfecha de estas tecnologías en empresas con menores recursos.

Los modelos existentes en el mercado pueden clasificarse en distintos tipos. Las tres principales características que definen la clase de AGV son: el modo de navegación que utilizan, la forma en que llevan la carga y la interfaz que poseen para comunicarse con el usuario que define la trayectoria de este.

Los ejemplos más comunes de navegación son:

- Tecnología LIDAR, modelado 3D del entorno y geolocalización por triangulación.
- Seguimiento de línea (magnética o visual).
- Sensores laser.

Luego, las formas en las que se puede llevar la carga son esencialmente dos:

- Vehículos de carga.
- Vehículos de remolque.

Por último, la interfaz con el usuario se clasifica según:

- Network de AGVs (Interfaz gráfica que muestra todos los AGVs en cuestión).
- Definición de trayectoria por unidad.

## 5.2. Contexto del proyecto

En la actualidad, Argentina busca no quedarse atrás respecto a las ventajas tecnológicas que la industria implementa a nivel global. En los países industrializados, las empresas que se dedican a la fabricación o a logística, entre otras, consideran a los AGVs como una pieza indispensable en el proceso de producción. Así, Argentina busca adoptar esta herramienta en su industria nacional. En particular, se buscan vehículos autónomos que puedan transportar diferentes tipos de productos dentro de una fábrica o planta industrial. Hoy en día es necesario importar dichos vehículos de empresas extranjeras que, dado su costo y mantenimiento, son solo rentables para empresas de gran escala.

Por lo tanto, el proyecto surge como una propuesta para aquellas empresas que cuentan con dificultades a la hora de disponer de un sistema de AGVs, ya sea por cuestiones de costos, de importación y/o también por cuestiones de disponibilidad y mantenimiento en el mercado local. La idea del proyecto fue propuesta por una empresa que brinda soluciones de automatización y que vio una oportunidad rentable en llevar a cabo el desarrollo de una solución para este tipo de mercado.

Aunque inicialmente la empresa que propuso la idea se comprometió a cubrir los costos del proyecto mientras el equipo hacía el desarrollo, debido al contexto de emergencia social y crisis económica a causa de la pandemia del COVID-19, debieron desvincularse del proyecto. El equipo decidió, sin embargo, continuar con el proyecto respetando requerimientos similares a los planteados inicialmente, debiendo hacer algunas modificaciones debido a la quita del financiamiento y así reducir el costo final. La modificación o remoción de cada uno se justifica directamente en la sección de requerimientos.

## 6. Objetivos

### 6.1. Finalidad del proyecto

Este proyecto consiste en el desarrollo y documentación del diseño de un AGV. El mismo está orientado al traslado de cargas livianas en un ambiente industrial. Aunque no se construirá un producto final listo para salir al mercado, se plantea obtener un prototipo que cumpla todas las especificaciones del producto. Además, se busca que este producto sea fácilmente escalable en cuanto a la carga que traslada.

### 6.2. Planteamiento del problema por resolver

Se debe encontrar una solución para la fabricación de un AGV, que pueda transportar distintos tipos de materiales y productos. Este debe ser accesible para pequeñas y medianas empresas, que operan dentro del país. Además, debe considerar las normas de seguridad que rigen en el territorio argentino. El vehículo debe ser totalmente eléctrico, operar de forma autónoma, permitir ser controlado desde una aplicación externa al dispositivo y ser capaz de transportar una carga de un lugar a otro. Por último, se debe contemplar que la solución sea escalable en cantidad, es decir, que se pueda en un futuro desarrollar una red de estos vehículos que operen de forma conjunta, con el fin de optimizar el proceso de producción.

### 6.3. Alcance

El proyecto consiste concretamente en el diseño de un AGV funcional, junto con un prototipo que cumple con los mismos requerimientos. Esto implica el diseño de la metodología de funcionamiento y las interfaces que posee para su interacción con el entorno.

Se selecciona el hardware a utilizar, se desarrolla la arquitectura de software y se realiza el diseño mecánico del AGV. El producto se diseña para el transporte de cargas ligeras y es la base para futuros desarrollos de mayor envergadura. Además, se desarrolla una interfaz gráfica de diagnóstico y control manual del vehículo.

Vale la pena aclarar además que se incluye el desarrollo de la aplicación gráfica externa que permite controlar el dispositivo. Esta tendrá funciones intuitivas para definir rutas del vehículo y será parte de la demostración del funcionamiento. También se busca que esta aplicación sea escalable, de manera que con desarrollo luego del proyecto sea fácil obtener una solución que permita el manejo de una flota de AGVs.

## 7. Definición de Producto

### 7.1. Casa de calidad

Se realizó una casa de calidad, consultando el peso de los requerimientos de los clientes para el producto final con la empresa que propuso la primera idea de este proyecto.

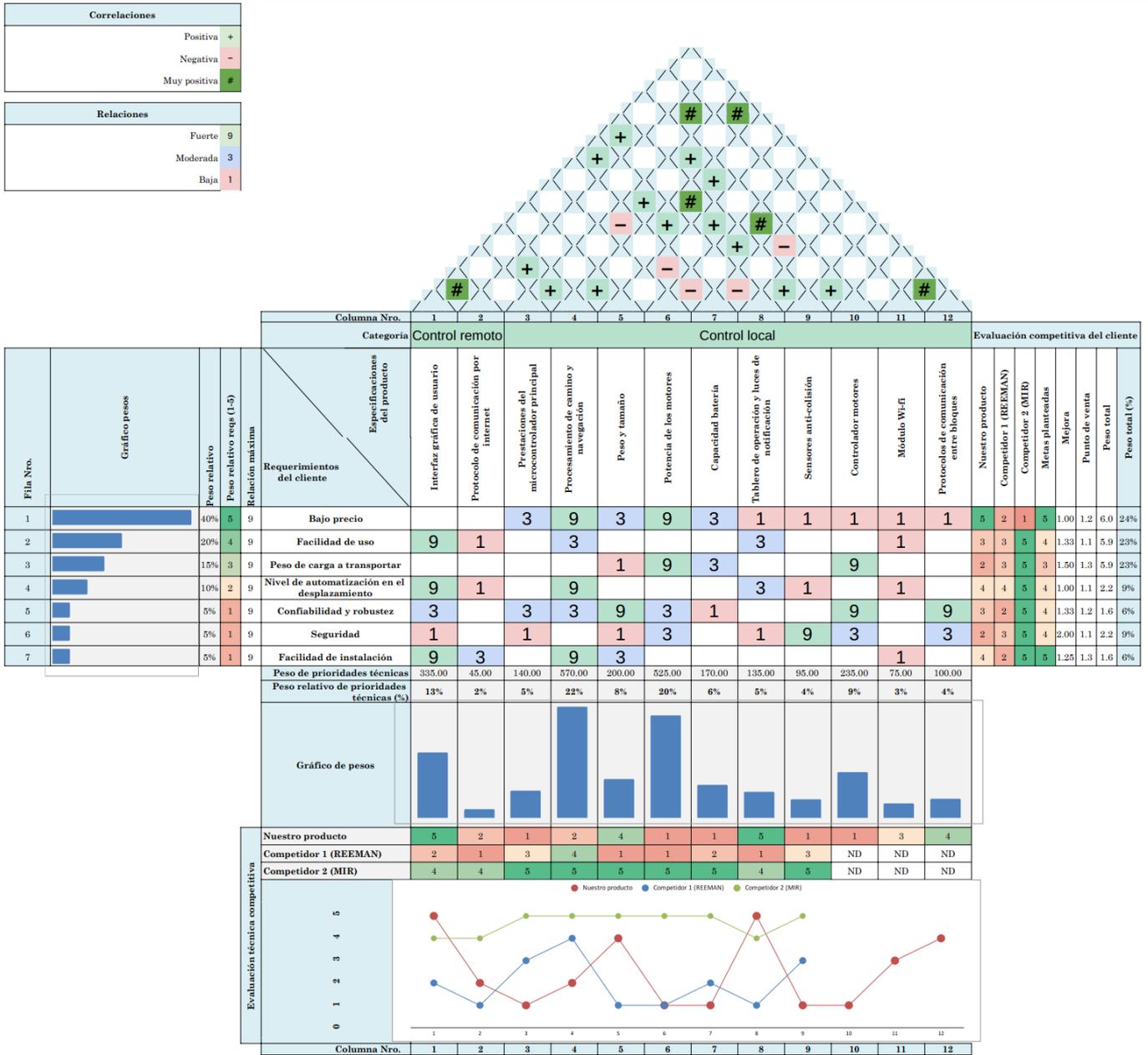


Figura 7-1 Casa de calidad

De esta casa de calidad se puede obtener que los principales puntos de foco en el desarrollo son el procesamiento de camino y navegación, la potencia de los motores y la interfaz de usuario. Además, nuestras ventajas contra la competencia son el costo y la facilidad de uso.

## 7.2. Requerimientos de Cliente

### 7.2.1. Requerimientos finales para trazabilidad

Se vuelcan en la siguiente tabla los requerimientos obtenidos directamente del cliente:

| Clasificación | ID     | Descripción  | Origen                 |
|---------------|--------|--|------------------------|
| EMERGENCIA    | REQ-01 | Al detectar una condición de emergencia, se deberá ejecutar un frenado de emergencia. Para volver a condiciones de operación normales, se debe requerir intervención manual.   | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| EMERGENCIA    | REQ-02 | Se deberán contar con las siguientes funciones de control de emergencias, ante las cuales se ejecutará un frenado de emergencia: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Botón de emergencia accesible.</li> <li>- Detección de pérdida de control de velocidad.</li> <li>- Detección de pérdida de camino.</li> <li>- Monitoreo del procesador (<i>watchdog</i>).</li> <li>- Pérdida de alimentación de motores.</li> <li>- Detección de fallas en la alimentación crítica para la seguridad.</li> </ul> | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| ENERGIA       | REQ-03 | El dispositivo deberá operar con energía eléctrica.  | Cliente                |
| ENERGIA       | REQ-04 | El equipo deberá tener una autonomía de al menos una hora. El diseño deberá ser fácilmente escalable en este aspecto.  | Cliente                |
| ENERGIA       | REQ-05 | Al estar con nivel de batería bajo, el vehículo deberá dirigirse a una estación de recarga de forma autónoma sin la intervención del usuario.  | Cliente                |
| ENERGIA       | REQ-06 | Cambio y recarga de baterías deberá ser en concordancia con ANSI/NFPA 505. El compartimento de baterías deberá ser diseñado en concordancia con ANSI/UL 583.   | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| ESTATICO      | REQ-07 | El dispositivo deberá poder acarrear una carga combinada de hasta 100 Kg. Se entiende como carga combinada un remolque con 4 ruedas más la carga efectiva a transportar.   | Cliente                |
| ESTATICO      | REQ-08 | Las dimensiones (LxWxH) del dispositivo no podrán superar 900x700x350mm. El peso del AGV debe ser menor a 50Kg. El diseño mecánico deberá ser seguro (sin bordes filosos y con advertencias visuales de peligros)  | Cliente                |
| ESTATICO      | REQ-09 | El dispositivo deberá poder operar en condiciones normales de temperatura, humedad y presión en el territorio argentino.   | Cliente                |

|            |                |  |                               |
|------------|----------------|--|-------------------------------|
| ESTATICO   | <b>REQ-10*</b> | Se deberá proveer una distancia de despeje del camino de 0.5m en ambos lados del camino o en un solo lado si del otro lado hay 0.1m o menos de distancia a una estructura continua y fija (por ejemplo, una pared).                          | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| FRENADO    | <b>REQ-11</b>  | El sistema de frenos de emergencia deberá accionarse en caso de que se interrumpa la alimentación.   | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| FRENADO    | <b>REQ-12</b>  | Al estar el vehículo detenido, se deberá aplicar un freno de estacionamiento para evitar movimientos inadvertidos.   | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| FRENADO    | <b>REQ-13</b>  | El vehículo con máxima carga deberá ser capaz de detenerse antes de hacer contacto con un objeto detectado que se encuentra dentro del rango de operación del sensor de colisión.  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| FRENADO    | <b>REQ-14</b>  | Un sistema de frenos de servicio podrá ser utilizado para detener el vehículo durante operación manual.  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| INTERFAZ   | <b>REQ-15</b>  | Se le podrá determinar el destino a trasladar la carga a través de una interfaz no cableada y centralizada.  | Cliente                       |
| INTERFAZ   | <b>REQ-16</b>  | La interfaz central deberá indicar al usuario el estado y ubicación aproximada del vehículo cada al menos 15 segundos.   | Cliente                       |
| INTERFAZ   | <b>REQ-17</b>  | Los protocolos de comunicación con la interfaz central deben estar diseñados para el manejo de múltiples AGVs.   | Cliente                       |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-18</b>  | La proyección del centro geométrico del plano inferior del vehículo sobre el piso no deberá apartarse más de 50cm de la curva de la trayectoria ideal. Dicha trayectoria no debe tener giros abruptos.                                       | Cliente                       |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-19</b>  | El dispositivo deberá detenerse en caso de un riesgo de colisión frontal.  | Cliente                       |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-20</b>  | El vehículo deberá poder recorrer de forma autónoma el camino entre dos estaciones, tomando el camino óptimo en el sistema que se utilice.   | Cliente                       |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-21</b>  | El AGV deberá ser capaz de moverse a una velocidad máxima de 60 m/min para cualquier carga de las permitidas.  | Cliente                       |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-22</b>  | En el caso que el dispositivo pierda la referencia o se desvíe del camino más de lo permitido, deberá realizar una parada de emergencia  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-23</b>  | Durante la operación normal y en emergencia del vehículo se debe procurar la estabilidad de la carga.  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-24</b>  | Cuando se detecta un obstáculo en el camino, el vehículo deberá disminuir parcialmente o por completo su velocidad. Si se detiene por completo, se puede reiniciar el movimiento después de un retraso de al menos 2 segundos cuando se deja | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |

|            |                |   |                               |
|------------|----------------|---|-------------------------------|
|            |                | de detectar el obstáculo. El reinicio del movimiento deberá ser completamente seguro.   |                               |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-25</b>  | El sistema deberá permitir a un usuario local entrar y salir de un modo manual de operación. En este modo, el operador contará con el control de la totalidad del vehículo y es responsable de su operación. El modo manual de operación deberá respetar lo establecido en las secciones aplicables de ANSI/ITSDF B56.9.  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-26*</b> | Si la carga excede el ancho del vehículo, el usuario debe requerir que se instalen sensores que cubran el área de movimiento necesaria para evitar contacto entre la carga y cualquier obstrucción.   | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| DETECCIÓN  | <b>REQ-27</b>  | Habrán uno o varios sensores dispuestos, seguros en su falla, para evitar la colisión del vehículo con objetos o personas que se encuentren en la dirección de movimiento. La medición debe permitir al vehículo detenerse antes de hacer contacto con el obstáculo, estando este último ubicado en el límite inferior de medición del sensor sobre la dirección de movimiento. | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| DETECCIÓN  | <b>REQ-28</b>  | El AGV contará con un paragolpes deformable que sea capaz de detectar una colisión. El mismo debe ser seguro en su falla y permitir al vehículo detenerse antes de realizar una fuerza sobre el obstáculo mayor a 134N paralela al piso.  | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| TABLERO    | <b>REQ-29</b>  | El vehículo deberá avisar mediante alguna señal audible y/o visual, a saber:<br>-Antes de comenzar a moverse.<br>-Durante su movimiento.<br>-Al tomar una bifurcación.<br>-Cuando pierda referencia del camino a seguir u otras fallas técnicas. Las señales deberán ser distintas.   | ANSI/ITS<br>DF B56.5-<br>2019 |
| TABLERO    | <b>REQ-30</b>  | El AGV deberá tener una interfaz de diagnóstico, mediante la cual se podrá obtener acceso a variables internas y se podrá actualizar el firmware de este. Para acceder a ella no debe ser necesario desmontar ninguna parte del AGV.  | Cliente                       |
| TABLERO    | <b>REQ-31</b>  | Deberá poseer un tablero de control sobre el vehículo que cuente con señales lumínicas y/o sonoras de manera de alertar y comunicar su estado a los operadores. Además, debe tener botones que les permitan a estos informar al AGV acciones como: carga montada, pausar misión y abortar misión.   | Cliente                       |
| TABLERO    | <b>REQ-32</b>  | Al finalizar el proceso de recarga, se debe encender una señal de disponibilidad, de forma que sea posible identificar que el vehículo está en condiciones de ser utilizado.  | Cliente                       |

|            |                |  |                        |
|------------|----------------|--|------------------------|
| TABLERO    | <b>REQ-33</b>  | El vehículo deberá contar con un interruptor para desconectar todos los circuitos del módulo de energía.   | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| GENERAL    | <b>REQ-34*</b> | En la estación de recarga se debe poder conectar de forma manual la batería al cargador.   | Cliente                |
| GENERAL    | <b>REQ-35</b>  | En cualquier modo de operación, el vehículo debe contar con un medio accesible para rápidamente desconectar las baterías.  | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| GENERAL    | <b>REQ-36</b>  | El costo total del vehículo debe ser comercialmente competitivo.   | Cliente                |
| GENERAL    | <b>REQ-37</b>  | La vida útil del vehículo (sin tomar en cuenta las baterías) debe ser mayor a 2 años con una disponibilidad no menor al 90%.   | Cliente                |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-38</b>  | El vehículo debe ser capaz de alcanzar la velocidad de nominal de navegación en al menos 2 segundos.   | Cliente                |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-39</b>  | Para marcar el camino entre dos estaciones, el vehículo deberá ser capaz de detectar una línea en el piso de la planta. El vehículo deberá seguir el camino marcado de forma segura y precisa. | Cliente                |
| MOVIMIENTO | <b>REQ-40</b>  | El vehículo deberá poder circular en un piso plano sin rampas (inclinación menor al 3%).   | ANSI/ITS DF B56.5-2019 |
| EMERGENCIA | <b>REQ-41</b>  | El vehículo deberá contar con protección contra cortocircuitos y sobreconsumo.   | Cliente                |

*Tabla 7-1 Requerimientos originales del proyecto. (\*Estos requerimientos en realidad son al usuario, se traducen en especificaciones para el manual de usuario)*

Hay una serie de requerimientos que debieron ser modificados u omitidos debido a las circunstancias imprevistas del contexto, las cuales fueron mencionadas anteriormente. Se presentan en la Tabla 7-2 los requerimientos que no aplican al producto diseñado y los que fueron modificados respecto a los planteados originalmente. El origen y la clasificación de cada requerimiento ya fueron mencionados en la tabla anterior.

| Acción     | ID       | Descripción   | Comentarios   |
|------------|----------|---|---|
| MODIFICADO | REQ-04-M | El equipo deberá tener una autonomía de al menos veinte minutos. El diseño deberá ser fácilmente escalable en este aspecto.   | Se acordó con el cliente la disminución en la autonomía para reducir el costo del producto final.                       |
| MODIFICADO | REQ-05-M | Al estar con nivel de batería bajo, el vehículo deberá comunicarlo por la interfaz no cableada.   | Se decidió con el cliente el remover la carga automática para agilizar el desarrollo del producto final.                |
| ELIMINADO  | REQ-06   | Cambio y recarga de baterías deberá ser en concordancia con ANSI/NFPA 505. El compartimiento de baterías deberá ser diseñado en concordancia con ANSI/UL 583.                     | Debido al alto costo de acceso a la norma ANSI/UL 583, no se consideró para el producto final.                          |
| MODIFICADO | REQ-07-M | El dispositivo deberá poder llevar una carga de hasta 10 Kg sobre su plano superior.  | Se acordó remover el carro para reducir complejidades mecánicas que requieren instalaciones especializadas.             |
| ELIMINADO  | REQ-11   | El sistema de frenos de emergencia deberá accionarse en caso de que se interrumpa la alimentación.  | Se pactó con el cliente que los frenos mecánicos son prescindibles para el producto final.                              |
| ELIMINADO  | REQ-13   | El vehículo con máxima carga deberá ser capaz de detenerse antes de hacer contacto con un objeto detectado que se encuentra dentro del rango de operación del sensor de colisión. | Se pactó con el cliente que el sistema de detección de colisiones no era necesario                                      |
| ELIMINADO  | REQ-14   | Un sistema de frenos de servicio podrá ser utilizado para detener el vehículo durante operación manual  | Se pactó con el cliente que los frenos mecánicos eran prescindibles.  |
| ELIMINADO  | REQ-19   | El dispositivo deberá detenerse en caso de un riesgo de colisión frontal.   | Se acordó con el cliente que el sistema de detección de colisiones no era necesario                                     |
| MODIFICADO | REQ-21-M | El AGV deberá ser capaz de moverse a una velocidad máxima de 0.4 m/seg para cualquier carga de las permitidas.  | Se pactó con el cliente que, al bajar la velocidad de operación, el sistema de detección de colisiones no era necesario |

|            |                 |   |  |
|------------|-----------------|---|--|
| ELIMINADO  | <b>REQ-24</b>   | Cuando se detecta un obstáculo en el camino, el vehículo deberá disminuir parcialmente o por completo su velocidad. Si se detiene por completo, se puede reiniciar el movimiento después de un retraso de al menos 2 segundos cuando se deja de detectar el obstáculo. El reinicio del movimiento deberá ser completamente seguro.  | Se acordó con el cliente que el sistema de detección de colisiones no era necesario  |
| ELIMINADO  | <b>REQ-26*</b>  | Si la carga excede el ancho del vehículo, el usuario debe requerir que se instalen sensores que cubran el área de movimiento necesaria para evitar contacto entre la carga y cualquier obstrucción.   | Se acordó con el cliente que el sistema de detección de colisiones no era necesario  |
| ELIMINADO  | <b>REQ - 27</b> | Habrán uno o varios sensores dispuestos, seguros en su falla, para evitar la colisión del vehículo con objetos o personas que se encuentren en la dirección de movimiento. La medición debe permitir al vehículo detenerse antes de hacer contacto con el obstáculo, estando este último ubicado en el límite inferior de medición del sensor sobre la dirección de movimiento. | Se acordó con el cliente que el sistema de detección de colisiones no era necesario  |
| ELIMINADO  | <b>REQ-28</b>   | El AGV contará con un paragolpes deformable que sea capaz de detectar una colisión. El mismo debe ser seguro en su falla y permitir al vehículo detenerse antes de realizar una fuerza sobre el obstáculo mayor a 134N paralela al piso.  | Se acordó con el cliente no incluir el paragolpes en el diseño.  |
| ELIMINADO  | <b>REQ-32</b>   | Al finalizar el proceso de recarga, se debe encender una señal de disponibilidad, de forma que sea posible identificar que el vehículo está en condiciones de ser utilizado.  | Se pactó con el cliente eliminar la carga automática para el desarrollo del producto final. La carga se hará de forma manual con un sistema de carga será externo. |
| MODIFICADO | <b>REQ-36-M</b> | El precio de venta del producto no debe superar los 3500 US\$ y el costo de fabricación del producto deberá ser comercialmente factible para esto.  | Se acordó con el cliente un valor de venta máximo.   |

Tabla 7-2 Requerimientos modificados.

### 7.3. Diagrama Funcional de Interfaces

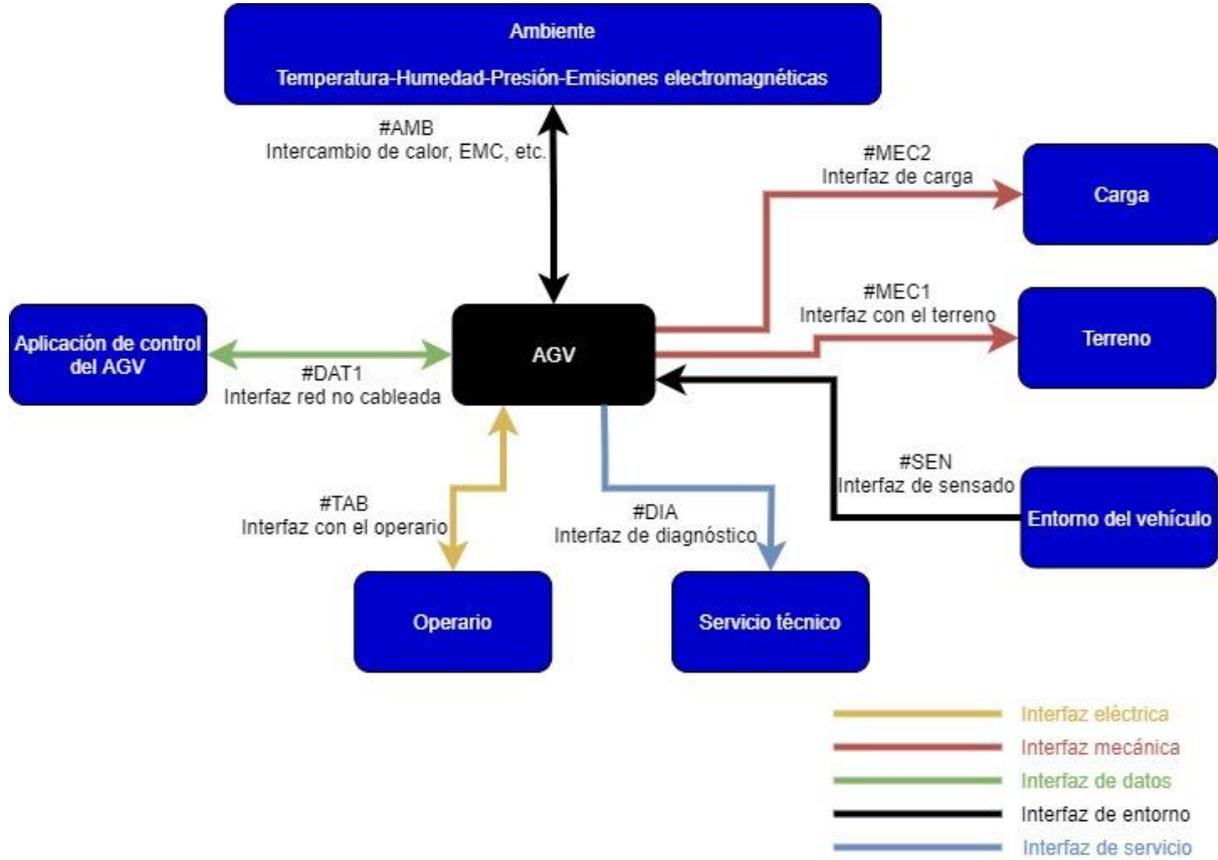


Figura 7-2 Diagrama de interfaces

### 7.4. Especificaciones de Diseño.

#### 7.4.1. Especificaciones Funcionales

| Leyenda para Especificaciones          |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Aplicabilidad                          | Validación                        |
| <b>DP:</b> Dispositivo, Prototipo      | <b>I:</b> Inspección Visual       |
| <b>IP:</b> Instalación, Prototipo      | <b>D:</b> Documentación de Diseño |
| <b>DF:</b> Dispositivo, Producto Final | <b>S:</b> Simulación              |
| <b>IF:</b> Instalación, Producto Final | <b>T:</b> Test                    |

Tabla 7-3 Leyenda de uso en especificaciones

| ID               | Descripción   | Origen  | Aplicabilidad Validación     |
|------------------|---|---|------------------------------|
| <b>FUN-OP-01</b> | Al indicarle una estación de destino, el AGV deberá recorrer el camino óptimo dentro del sistema hasta dicha estación de forma autónoma. Para hacer esto, deberá ser capaz de seguir un camino marcado en el piso. Se denomina misión a un conjunto de estaciones que el vehículo debe recorrer de forma secuencial para cumplir cierto propósito. El vehículo luego podrá continuar a otra estación o quedar liberado hasta que le asignen un nuevo viaje. | <b>REQ-20</b><br><b>REQ-39</b>                    | <b>DP, DF</b><br><b>T</b>    |
| <b>FUN-OP-02</b> | El dispositivo deberá contar con un sistema de control que le permita fijar la velocidad lineal y angular del vehículo.   | <b>REQ-18</b><br><b>REQ-21-M</b><br><b>REQ-22</b> | <b>DP, DF</b><br><b>T</b>    |
| <b>FUN-OP-03</b> | El AGV deberá poder transportar una carga de hasta 10 kg.   | <b>REQ-07-M</b>                                   | <b>DP, DF</b><br><b>D, T</b> |
| <b>FUN-OP-04</b> | El AGV deberá poder leer e interpretar <i>tags</i> dispuestas al costado del camino. Estos <i>tags</i> le darán información al vehículo sobre: la ubicación en la que se encuentra, que está entrando en (o saliendo de) una zona de velocidad restringida, que ha llegado a una estación.  | <b>REQ-16</b><br><b>REQ-20</b>                    | <b>DP, DF</b><br><b>T</b>    |
| <b>FUN-OP-05</b> | A través de una conexión no cableada, el dispositivo podrá comunicarse con un sistema centralizado de operación denominado "Sistema de Control de Mandos". A través de ella, el equipo podrá recibir misiones, comunicar su estado, el avance de misiones, situaciones de emergencia y errores. Además, podrá comunicar o recibir que la misión fue pausada o abortada.   | <b>REQ-02</b><br><b>REQ-05-M</b><br><b>REQ-15</b> | <b>DP, DF</b><br><b>T</b>    |
| <b>FUN-OP-06</b> | El AGV deberá operar con baterías eléctricas y deberá monitorear su estado de carga.  | <b>REQ-05-M</b><br><b>REQ-03</b>                  | <b>DP, DF</b><br><b>D, T</b> |
| <b>FUN-OP-07</b> | El vehículo deberá avisar mediante alguna señal audible y/o visual, a saber:<br>-Antes de comenzar a moverse.<br>-Durante su movimiento.<br>-Al tomar una bifurcación.<br>-Cuando pierda referencia del camino a seguir u otras fallas técnicas.<br>Las señales deberán ser distintas.  | <b>REQ-29</b>                                     | <b>DP, DF</b><br><b>T</b>    |
| <b>FUN-OP-08</b> | El dispositivo poseerá un tablero que contará con indicadores lumínicos y botones de entrada, de manera de poder interactuar con operarios.   | <b>REQ-31</b>                                     | <b>DP, DF</b><br><b>I, D</b> |

Tabla 7-4: Especificaciones Funcionales

## 7.4.2. Especificaciones de Interfaz

| ID          | Descripción  | Origen   | Aplicabilidad Validación |
|-------------|--|----------|--------------------------|
| INT-MEC1-01 | La superficie por donde se moverá el vehículo deberá ser plana, con un ángulo de inclinación máximo de 3%.     | REQ-40   | IP, IF<br>I              |
| INT-MEC1-02 | La superficie deberá ser seca y libre de polvo excesivo en las inmediaciones del camino que sigue el vehículo. | REQ-07-M | IP, IF<br>I              |

Tabla 7-5 Especificaciones de Interfaz MEC1

| ID          | Descripción  | Origen   | Aplicabilidad Validación |
|-------------|--|----------|--------------------------|
| INT-MEC2-01 | La parte superior del dispositivo deberá tener una superficie estable y segura, en la cual se le pueda cargar el peso a transportar. | REQ-07-M | DP, DF<br>I, D, T        |

Tabla 7-6 Especificaciones de interfaz MEC2

| ID          | Descripción  | Origen           | Aplicabilidad Validación |
|-------------|--|------------------|--------------------------|
| INT-DAT1-01 | Se deberá mandar cada 10 segundos una señal de que la conexión sigue en pie. En caso de perder conexión, el dispositivo tiene que seguir operando de forma autónoma en condiciones normales hasta terminar la misión o recuperar la señal.   | REQ-16           | DP, DF<br>D, T           |
| INT-DAT1-02 | El vehículo se debe poder comunicar de forma inalámbrica.  | REQ-15           | DP, DF<br>T              |
| INT-DAT1-03 | A través de un protocolo, los AGVs deberán poder comunicar el estado del vehículo, su ubicación aproximada y el estado de batería. Además, en la misma interfaz se deberá poder enviar un recorrido para el AGV, con su estación inicial y final, y paradas. También se podrá abortar y pausar misiones. | REQ-15<br>REQ-16 | DP, DF<br>T              |
| INT-DAT1-04 | Los protocolos de comunicación con la interfaz central deben estar diseñados para el manejo de múltiples AGVs, es decir, que permitan que el sistema sea escalable.  | REQ-17           | DP, DF<br>D              |
| INT-DAT1-05 | Se deberá enviar un mensaje que alerte en el caso de batería baja.   | REQ-05-M         | DP, DF<br>T              |

Tabla 7-7 Especificaciones de interfaz DAT1

| ID         | Descripción   | Origen           | Aplicabilidad Validación |
|------------|---|------------------|--------------------------|
| INT-TAB-01 | El tablero del dispositivo deberá tener una señal luminosa que indique si hubo una falla técnica.   | REQ-29<br>REQ-31 | DP, DF<br>T              |
| INT-TAB-02 | Se contará con un interruptor para energizar/des energizar por completo el vehículo. Se mostrará que está energizado con una señal luminosa.  | REQ-33           | DP, DF<br>T              |
| INT-TAB-03 | Habrà una señal luminosa claramente visible notificando que el vehículo está en movimiento.   | REQ-29           | DP, DF<br>T              |
| INT-TAB-04 | Una señal luminosa en el vehículo indicará que llegó a su destino especificado y está esperando una acción humana antes de liberarse.   | REQ-29           | DP, DF<br>T              |
| INT-TAB-05 | Uno o varios botones de fácil acceso permitirán al operario indicarle al vehículo que se realizó una de las siguientes acciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Que ya se ha realizado la tarea requerida en una estación de destino.</li> <li>• Pausar/continuar misión</li> <li>• Abortar misión</li> <li>• Continuar misión luego de una parada de emergencia</li> </ul> | REQ-31           | DP, DF<br>T              |
| INT-TAB-06 | El vehículo contará con 2 señales luminosas a cada lado, similar al guiño de un auto. Al ingresar en una bifurcación, encenderá la luz correspondiente a la dirección que va a tomar a la vez que emitirá una señal sonora.   | REQ-29           | DP, DF<br>T              |

Tabla 7-8 Especificaciones de interfaz TAB

| ID         | Descripción   | Origen           | Aplicabilidad Validación |
|------------|---|------------------|--------------------------|
| INT-SEN-01 | Una trayectoria no podrá tener un radio de curvatura menor a 1m.  | REQ-23<br>REQ-18 | IP, IF<br>I, T           |
| INT-SEN-02 | La superficie no deberá presentar irregularidades significativas que puedan llegar a afectar los sensores del vehículo.   | REQ-07-<br>M     | IP, IF<br>I              |
| INT-SEN-03 | Una bifurcación debe tener una diferencia de 50+-10º con la trayectoria y luego de la bifurcación debe haber un tramo de al menos 2 metros hasta una nueva bifurcación. | REQ-18           | IP, IF<br>I              |
| INT-SEN-04 | El seguimiento de la línea se deberá hacer sin contacto con el suelo  | REQ-39           | IP, IF<br>I              |

Tabla 7-9 Especificaciones de interfaz SEN

| ID         | Descripción   | Origen | Aplicabilidad Validación |
|------------|---|--------|--------------------------|
| INT-DIA-01 | La interfaz permitirá acceder a variables internas del AGV para poder realizar diagnóstico.   | REQ-30 | DP, DF<br>T              |
| INT-DIA-02 | Esta interfaz permitirá realizar actualizaciones al firmware del AGV.   | REQ-30 | DP, DF<br>T              |
| INT-DIA-03 | El conector de acceso a la interfaz no deberá ser accesible desde afuera, pero deberá poder ser utilizado sin desmontar ningún elemento que pueda llegar a afectar la funcionalidad del vehículo. | REQ-30 | DP, DF<br>I              |
| INT-DIA-04 | A través de la interfaz de diagnóstico se podrá manejar en un modo manual al vehículo. El usuario puede entrar y salir de este modo de operación fácilmente.                                      | REQ-25 | DP, DF<br>T              |

Tabla 7-10 Especificaciones de interfaz DIA

#### 7.4.3. Especificaciones de Performance

| ID     | Descripción  | Origen       | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------------|--------------------------|
| PER-01 | La proyección del centro geométrico del plano inferior del vehículo sobre el piso no deberá apartarse más de 45cm de la curva de la trayectoria ideal. | REQ-18       | DP, DF<br>T              |
| PER-02 | El producto deberá tener una autonomía de 25 minutos y de fácil expansión para mayores rendimientos.   | REQ-04-<br>M | DP, DF<br>D, T           |
| PER-03 | El vehículo deberá detenerse en caso de perder la referencia al camino por más de dos segundos.  | REQ-22       | DP, DF<br>T              |
| PER-04 | El vehículo debe ser capaz de alcanzar la velocidad nominal de navegación en al menos 1,8 segundos.  | REQ-38       | DP, DF<br>T              |
| PER-05 | El AGV deberá poder transportar la carga máxima a una velocidad máxima de $0,45 \pm 0,01$ m/s.   | REQ-21-<br>M | DP, DF<br>T              |

Tabla 7-11 Especificaciones de performance

## 7.4.4. Especificaciones de Implementación

| ID     | Descripción  | Origen | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------|--------------------------|
| OPE-01 | El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la temperatura ambiente sea: $-10^{\circ}\text{C} < \text{TAMB} < 50^{\circ}\text{C}$ (Valores normales de temperatura ambiente) | REQ-09 | DP, DF<br>D              |
| OPE-02 | El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la humedad sea:<br>$0\% < \text{RH} < 100\%$ (Valores normales de humedad relativa ambiente)                                     | REQ-09 | DP, DF<br>D              |
| OPE-03 | El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la presión atmosférica sea: $60 \text{ kPa} < \text{PATM} < 110 \text{ kPa}$   | REQ-09 | DP, DF<br>D              |

Tabla 7-12 Especificaciones de Operación

| ID     | Descripción  | Origen | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------|--------------------------|
| DIM-01 | El dispositivo no deberá exceder las siguientes dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Largo <math>&lt; 850 \text{ mm}</math></li> <li>• Ancho <math>&lt; 650 \text{ mm}</math></li> <li>• Alto <math>&lt; 330 \text{ cm}</math></li> </ul> | REQ-08 | DP, DF<br>T              |
| DIM-02 | El peso del AGV sin carga debe ser menor a 45 Kg.  | REQ-08 | DP, DF<br>T              |

Tabla 7-13 Especificaciones dimensionales y de peso

| ID     | Descripción  | Origen   | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|----------|--------------------------|
| COS-01 | El precio de venta del producto no debe superar los 3500 US\$ y el costo de fabricación del producto deberá ser comercialmente factible para esto. | REQ-36-M | DP, DF<br>D              |

Tabla 7-14 Especificaciones de costo

## 7.4.5. Especificaciones de Servicio (RAMS)

| ID     | Descripción  | Origen | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------|--------------------------|
| SEG-01 | Si en algún lugar (accesible o no) hay tensiones peligrosas, deberá haber un cartel que lo advierta.   | REQ-08 | DP, DF<br>I              |
| SEG-02 | La superficie del vehículo deberá ser segura para evitar cualquier tipo de corte por contacto con el equipo.   | REQ-08 | DP, DF<br>I              |
| SEG-03 | Se deberá indicar a qué altura máxima puede estar el centro de masa de la carga a llevar, de manera de asegurar que el vehículo no vuelque.  | REQ-23 | DP, DF<br>D              |
| SEG-04 | Ante una situación de emergencia, el vehículo deberá frenarse y no podrá continuar su movimiento hasta que se le indique manualmente por la interfaz de comunicaciones o por un botón del tablero. | REQ-01 | DP, DF<br>T              |
| SEG-05 | Al estar detenido el dispositivo, los motores deberán estar frenados para evitar movimientos inadvertidos  | REQ-12 | DP, DF<br>D              |
| SEG-06 | El conector a la batería del vehículo deberá ser de fácil remoción y accesible.  | REQ-35 | DP, DF<br>I              |
| SEG-07 | El tablero del vehículo deberá tener al menos un botón de frenado de emergencia fácilmente alcanzable desde el frente del AGV.   | REQ-02 | DP, DF<br>I              |
| SEG-08 | El vehículo deberá tener una protección contra cortocircuitos de reactivación manual.  | REQ-41 | DP, DF<br>D              |
| SEG-09 | El vehículo deberá tener una protección contra sobreconsumo.   | REQ-41 | DP, DF<br>D              |

Tabla 7-15 Especificaciones de seguridad

| ID     | Descripción  | Origen | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------|--------------------------|
| DIS-01 | El dispositivo deberá tener una disponibilidad mayor al 95% a lo largo de toda su vida útil. | REQ-37 | DP, DF<br>D              |

Tabla 7-16 Especificaciones de disponibilidad

| ID     | Descripción  | Origen | Aplicabilidad Validación |
|--------|--|--------|--------------------------|
| CON-01 | El producto deberá tener un MTBF no menor a 5 años.  | REQ-37 | DP, DF<br>D              |
| CON-02 | El producto deberá tener una vida útil no menor a 5 meses (considerando un 10% de unidades defectuosas). | REQ-37 | DP, DF<br>D              |

*Tabla 7-17 Especificaciones de confiabilidad*

| ID     | Descripción   | Origen             | Aplicabilidad Validación |
|--------|---|--------------------|--------------------------|
| MAN-01 | El producto deberá incluir un manual de usuario.  | REQ-10*<br>REQ-34* | DP, DF<br>D              |
| MAN-02 | El equipo deberá comunicar todos los errores a través de la interfaz no cableada.   | REQ-30<br>REQ-31   | DP, DF<br>I              |
| MAN-03 | El equipo deberá contar con una indicación luminosa que informe que existe una conexión exitosa a la red no cableada.                               | REQ-30<br>REQ-31   | DP, DF<br>I              |
| MAN-04 | A través del diagnóstico el equipo deberá ser capaz de comunicar variables internas para diagnosticar errores que no sean normales de la operación. | REQ-30<br>REQ-31   | DP, DF<br>I              |

*Tabla 7-18 Especificaciones de mantenibilidad*

## 8. Plan de Validación

### 8.1. Diseño de Bancos de Pruebas

#### 8.1.1. Banco de pruebas de características físicas

Se deberá retirar la batería de su compartimento. Para realizar mediciones de distancias se contará con un metro de una precisión milimétrica. En cuanto al peso, se medirá con una balanza de tiro de una precisión de 0,01 Kg. Se deberá contar con una estructura o individuo que pueda sostener la balanza de tiro con cada carga (se medirá el peso de la batería y de la estructura por separado).

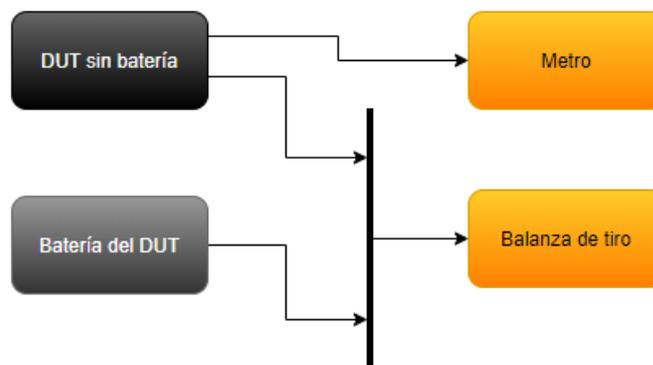


Figura 8-1 Banco de pruebas de características físicas

#### 8.1.2. Banco de pruebas estáticas

Con la batería removida, se conectarán los cables de alimentación a una fuente de tensión regulada que deberá poder entregar 15 V, 3 A. El DUT estará suspendido de manera que pueda energizar sus motores sin desplazarse. Se deberá disponer de un osciloscopio, con al menos una punta y su tierra deberá estar conectada con la referencia de la fuente. El ambiente deberá tener una señal de *Wi-Fi* tal que el DUT pueda mantener una conexión estable. Por último, el DUT también estará conectado mediante un puerto USB con una computadora que tenga el programa de la interfaz de diagnóstico. Se deberá contar con un *tag* de estación para acercarse a la cámara y una línea de pista sobre una hoja para emular un camino a la cámara.

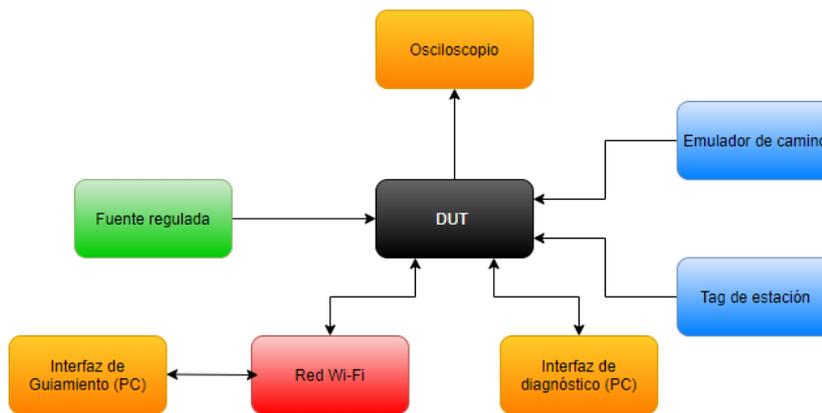


Figura 8-2 Banco de pruebas estáticas

### 8.1.3. Banco de pruebas de movimiento

Este banco de pruebas consiste en una trayectoria recta, de al menos 4,5 m, marcada sobre el suelo. El centro del DUT estará alineado con la misma. El suelo también contará con dos marcas visuales al costado de la recta, con una separación entre ellas de  $4,0 \pm 0,1$  m para medir la velocidad. Las marcas deben estar de manera que el vehículo llegue a la velocidad de movimiento antes de pasar por la primera marca. El DUT deberá estar conectado mediante la red *Wi-Fi*. Además, se deberá contar con una computadora con el programa de la interfaz de diagnóstico instalado. Esta debe estar conectada al DUT en movimiento, mediante un puerto USB. Se deberá contar con un cronómetro de una precisión igual o mayor a la centésima de segundo y con una balanza de tiro para pesar la carga. La misma carga se usará para los siguientes bancos de prueba, por lo que no será necesario pesarla de nuevo.

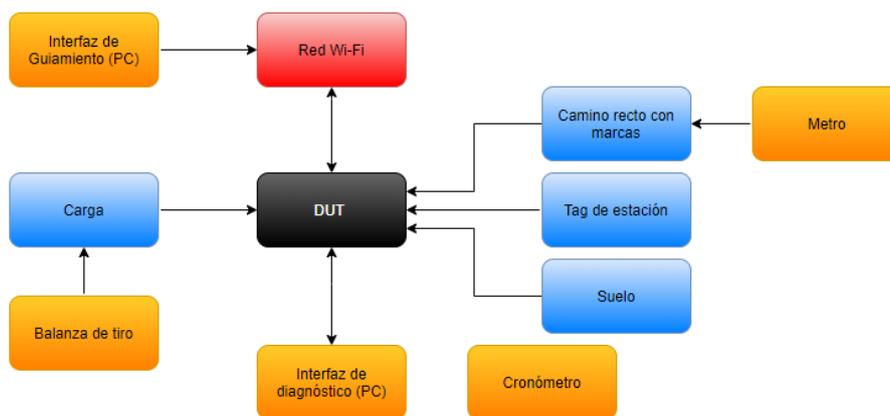
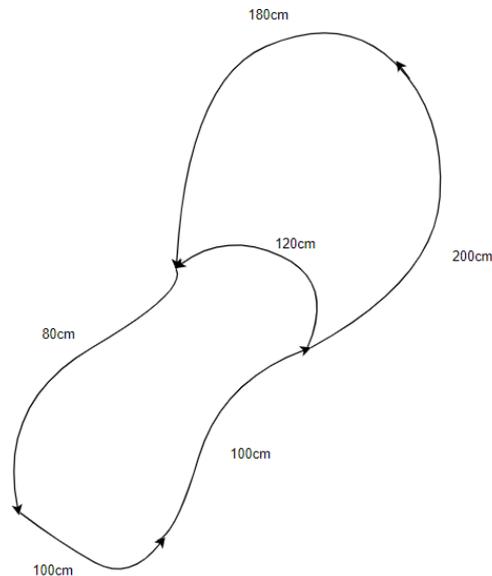


Figura 8-3 Banco de pruebas de movimiento

### 8.1.4. Banco de pruebas sobre una trayectoria

Este banco de pruebas dispondrá de un camino con la forma de la Figura 8-4, respetando las distancias del trayecto con una tolerancia de hasta 10 cm. Se debe garantizar que en alguna parte del trayecto se tenga un radio de curvatura menor o igual a 1 m, de manera que el DUT pueda recorrer la curva más exigente posible

con las especificaciones. Además, se debe garantizar que las bifurcaciones respeten la especificación **INT-SEN-03**.



*Figura 8-4 Trayectoria para las pruebas*

El DUT se ubicará sobre la pista siguiendo la orientación de movimiento marcado. El DUT deberá estar conectado por la red *Wi-Fi* y se deberá disponer una computadora con el programa del control de mandos. Se deberá contar con un elemento que permita elevar el vehículo para hacer pruebas con el vehículo estático, pero con visión a la línea de trayectoria.

Además, se deberá contar con un sistema para determinar cuánto se aparta de la trayectoria del centro del vehículo. Para esto se utilizarán indicadores adheridos sobre la estructura mecánica en su parte frontal y posterior, marcando un rango de desplazamiento del centro. La finalidad de estos indicadores será para evaluar por inspección visual si la trayectoria se mantiene dentro de ese rango, y luego despejar el desplazamiento del centro del vehículo obtenido. Para estos marcadores se utilizarán varillas y cinta adhesiva para sujetarlo. Por último, se necesitará un metro de precisión milimétrica para medir la distancia entre indicadores.

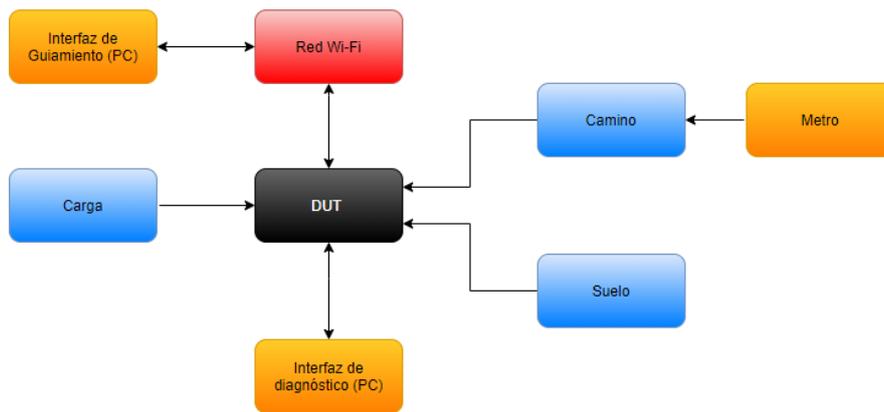


Figura 8-5 Banco de pruebas sobre trayectoria

### 8.1.5. Banco de pruebas de misiones

Este banco de pruebas dispondrá de un camino con la forma de la Figura 8-6, respetando las distancias del trayecto con una tolerancia de hasta 10 cm. El DUT se ubicará sobre la pista siguiendo la orientación de movimiento marcado. El DUT deberá estar conectado por la red *Wi-Fi* y se deberá disponer una computadora con el programa del control de mandos.

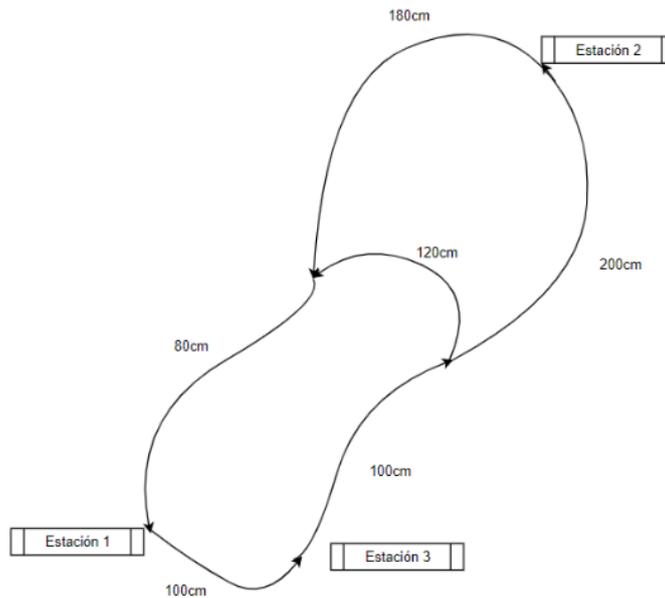


Figura 8-6 Trayectoria con estaciones para pruebas

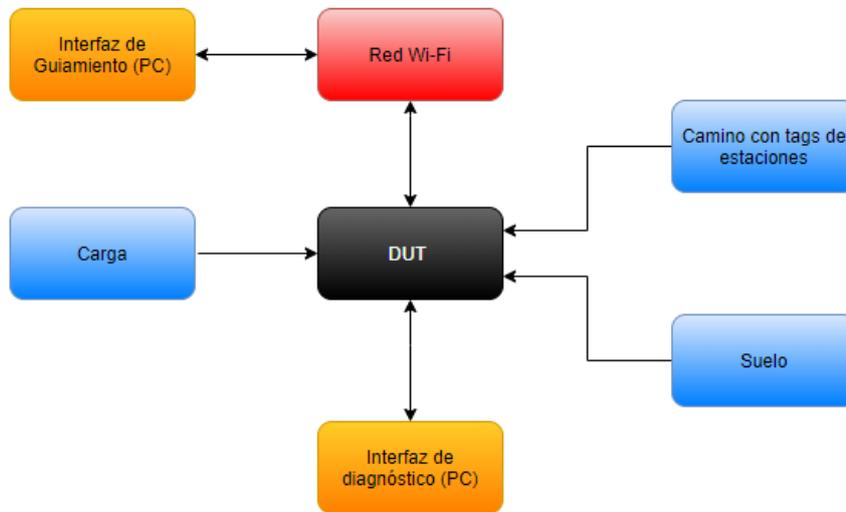


Figura 8-7 Banco de pruebas para misiones

## 8.2. Especificaciones de ensayos

Los ensayos contemplan los siguientes aspectos:

| Aspecto  | ID del ensayo | Grabación       |
|--|---------------|-----------------|
| Estructura del vehículo.                                       | T-CAR-F       | -               |
| Comunicación a través de <i>Wi-Fi</i> .                        | T-B-COM       | T-B-COM.mp4     |
| Funcionamiento de la interfaz de diagnóstico.                  | T-B-DIA       | T-B-DIA.mp4     |
| Monitoreo de batería.  | T-B-BAT       | T-B-BAT.mp4     |
| Comprobación de velocidad de movimiento.                       | T-CTRL-VEL    | T-CTRL-VEL.mp4  |
| Modo manual.   | T-MANUAL      | T-MANUAL.mp4    |
| Traslado estable de carga estipulada.                          | T-EST-CARGA   | T-EST-CARGA.mp4 |
| Tiempo de establecimiento a velocidad máxima con carga máxima. | T-SETTLING    | T-SETTLING.png  |
| Seguimiento de la trayectoria con carga.                       | T-TRAY-01     | T-TRAY-01.mp4   |
| Frenado ante pérdida de referencia de trayectoria.             | T-TRAY-02     | T-TRAY-02.mp4   |
| Autonomía.   | T-AUTON       | T-AUTON.mp4     |
| Verificación de funcionamiento en misión simple.               | T-MIS-01      | T-MIS-01.mp4    |
| Manejo de eventos de emergencia, pausa y aborto en la misión.  | T-MIS-02      | T-MIS-02.mp4    |
| Verificación de funcionamiento en misión compleja.             | T-MIS-03      | T-MIS-03.mp4    |

Tabla 9.2 Bancos de prueba utilizados

| ID Aplicabilidad  | Procedimiento  | Criterio   |
|---|--|--|
| <p><b>Procedimiento general:</b> Se deberá someter el DUT al <i>Banco de pruebas de características físicas</i>. Se debe desenergizar el vehículo, desconectar la batería y luego removerla del DUT, para pesarla por separado.</p> |  |  |
| T-CAR-F<br>Proto, Final   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Medir el ancho, largo y alto de la estructura del DUT (sin colocar en el soporte vertical).</li> <li>2. Colocar la batería en la balanza y tomar su peso (Pb).</li> <li>3. Retirar la batería y colocar la estructura en la balanza. Tomar su peso (Pd).</li> <li>4. Verificar que la estructura no cuente con bordes filosos en las uniones.</li> </ol> | -L, W, H <<br>900x700x330 mm<br>-Pb + Pd < 45 Kg<br>-Sin bordes filosos visibles |

Tabla 9.3 Test de características físicas

| ID<br>Aplicabilidad   | Procedimiento   | Criterio   |
|---|---|--|
| <p><b>Procedimiento General:</b> Se conectará el DUT al <i>Banco de pruebas estáticas</i>. Se deberá verificar que la fuente se encuentre en una tensión mayor a 12 V, de manera que el equipo esté energizado. También se deberá verificar que la computadora con la interfaz esté conectada a <i>Wi-Fi</i>.</p> |   |  |
| <p>T-B-COM<br/>Proto, Final</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Colocar el emulador de camino en el piso, dentro del campo de visión de la cámara.</li> <li>2. Verificar que el DUT pudo conectarse a internet a través de la observación de una señal luminosa del centro de comunicaciones.</li> <li>3. Enviar una misión simple al DUT.</li> <li>4. Verificar que los motores se mueven y que se enciende una señal luminosa del tablero indicando que está en misión.</li> <li>5. Verificar en la interfaz que, a partir del primer mensaje recibido del DUT, el tiempo entre mensajes del AGV de conexión en pie es menor a 10 seg. Se deberán contar al menos cinco mensajes.</li> <li>6. Por último, cerrar la interfaz, acercar el <i>tag</i> de estación a la cámara y comprobar que el DUT termina la misión al frenar los motores a pesar de que la interfaz no está conectada.</li> </ol> | <p>Los indicadores luminosos se accionan en los momentos esperados</p> <p>Se reciben los mensajes en la interfaz en los tiempos indicados.</p> <p>Se continúa con la misión a pesar de perder la conexión.</p> |

|                                 |  |   |
|---------------------------------|--|---|
| <p>T-B-DIA<br/>Proto, Final</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT está conectado a la computadora. Colocar el emulador de camino en el piso frente a la cámara.</li> <li>2. Desde la interfaz de diagnóstico, conectarse con el dispositivo y comprobar el acceso a variables internas.</li> <li>3. Verificar que se puede establecer velocidades de operación para ambos motores</li> <li>4. Ajustar constantes del control de ambos motores y ver que la respuesta a un escalón varía debido a ellas</li> <li>5. Verificar que el desplazamiento del camino medido se corresponde con el real al mover el emulador del camino</li> <li>6. Variar los ajustes del controlador del seguimiento de línea. Hacer un movimiento repetible de manera de poder contrastar los cambios de las variables con las velocidades de los motores</li> <li>7. Ajustar constantes del control del motor y verificar que la respuesta de los motores ante movimientos del emulador de camino varía.</li> </ol> | <p>Se comprueba el acceso a las variables internas y se comprueba por la respuesta de los motores el ajuste de parámetros de control.</p> |
| <p>T-B-BAT<br/>Proto, Final</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que tanto el DUT como la computadora con el interfaz están conectados a <i>Wi-Fi</i> y que se reciben los mensajes periódicos.</li> <li>2. Comprobar que al bajar la tensión de la fuente regulada disminuye el nivel de batería mostrada en la interfaz de la computadora. Se debe confirmar que al subir la tensión también sube en la interfaz.</li> <li>3. Disminuir la tensión de la fuente regulada tal que la interfaz muestre un valor de batería crítico, determinado cuando se enciende el indicador de batería baja de la interfaz.</li> <li>4. Notar que la interfaz indique un valor por debajo del 30% y que se activa el indicador de batería baja.</li> </ol>  | <p>La alerta de batería baja se activa para la tensión crítica esperada.</p>  |

Tabla 9.3 Test básicos

| ID<br>Aplicabilidad  | Procedimiento  | Criterio  |
|--|--|---|
| <p><b>Procedimiento General:</b> Se conectará el DUT al <i>Banco de pruebas de movimiento</i>, ubicándolo alineado con la trayectoria en un extremo de la recta.</p> |  |   |
| <p>T-CTRL-VEL<br/>Proto, Final</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado, conectado a internet y que la interfaz de usuario también.</li> <li>2. Cargar el peso máximo sobre el DUT. Verificar su peso con la balanza de tiro.</li> <li>3. Indicarle una misión simple hasta otra estación y verificar que comienza a seguir la línea.</li> <li>4. Cronometrar los tiempos por los que pasa por las marcas y propagar errores de medición para estimar la velocidad lineal real.</li> <li>5. Conectarse a la interfaz de diagnóstico y variar la velocidad de operación, repitiendo los dos últimos pasos para aquella configuración. Usar la velocidad máxima y otra configuración de velocidad como mínimo.</li> <li>6. Contrastar las velocidades medidas con las velocidades establecidas en el programa.</li> </ol> | <p>El DUT es capaz de seguir la trayectoria.</p> <p>Las velocidades medidas en todos los casos contienen en su error de medición a la velocidad seteada</p>     |
| <p>T-MANUAL<br/>Proto, Final</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado, conectado a internet y que la interfaz de usuario también.</li> <li>2. Conectar mediante un cable USB la computadora con el DUT.</li> <li>3. Enviar una misión simple a una estación con la interfaz de usuario y verificar que el DUT sigue la línea.</li> <li>4. Entrar en modo manual a través de la interfaz de diagnóstico.</li> <li>5. Maniobrar el vehículo durante al menos 30 seg.</li> <li>6. Posicionarlo de manera que el camino marcado esté en el campo visión de la cámara.</li> <li>7. Salir del modo manual y verificar que continúa con la misión siguiendo la línea.</li> </ol>   | <p>El vehículo entra en modo manual y se mueve como se le indica.</p> <p>Luego de salir del modo manual, puede continuar con la misión pendiente que tenía.</p> |

|                                     |   |   |
|-------------------------------------|---|---|
| <p>T-EST-CARGA<br/>Proto, Final</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado con la computadora mediante un cable USB.</li> <li>2. Montar una carga de al menos el peso máximo establecido en FUN-OP-03 sobre el DUT.</li> <li>3. Entrar en modo manual desde la interfaz de diagnóstico.</li> <li>4. Maniobrar por al menos un minuto. Indicarle al vehículo que se mueva a máxima velocidad y luego mantener en una configuración en la cual una rueda vaya a su velocidad máxima y la otra esté frenada, siendo esta la situación más favorable para un volcado. Repetir estos movimientos al menos dos veces.</li> <li>5. Verificar que el vehículo no vuelque.</li> </ol>  | <p>Durante todo el movimiento manual el vehículo no vuelca.</p>   |
| <p>T-SETTLING<br/>Proto, Final</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado con la computadora mediante un cable USB.</li> <li>2. Montar una carga de al menos el peso máximo establecido sobre el DUT.</li> <li>3. Encender la interfaz de diagnóstico y abrir las herramientas “Joystick” y “PID Tuning”.</li> <li>4. Activar el modo manual “binario” apretando la tecla T en la computadora. Verificar que la “Velocidad binaria” sea igual a la velocidad máxima del vehículo.</li> <li>5. Monitoreando las velocidades de las ruedas con los gráficos de “PID Tuning”, indicarle al vehículo un movimiento hacia adelante permanente.</li> <li>6. Una vez que el AGV alcanzó la velocidad máxima, detener el vehículo y guardar los datos de velocidades de las ruedas presionando el botón “Exportar CSV” disponible en la pestaña “Misc” de la herramienta “PID Tuning”.</li> <li>7. Analizar los datos obtenidos para determinar el tiempo que tarda el vehículo en alcanzar el 90% de la velocidad máxima. Este tiempo es el tiempo de establecimiento.</li> </ol> | <p>El vehículo tiene un tiempo de establecimiento a plena carga menor a dos seg.</p> <p>El DUT debe poder llegar la velocidad máxima.</p> |

*Tabla 9.3 Test de movimiento*

| ID<br>Aplicabilidad  | Procedimiento  | Criterio   |
|--|--|--|
| <p><b>Procedimiento General:</b> Se conectará el DUT al <i>Banco de pruebas sobre trayectoria</i>, ubicándolo alineado con la trayectoria. Se deberá revisar que no haya ningún objeto sobre el trayecto que puede afectar a la lectura del camino o colisionar con el DUT</p> |  |  |
| <p>T-TRAY-01<br/>Proto, Final</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado a internet, y que la interfaz de usuario también esté conectada. Colocar los indicadores en el frente y la parte posterior, en los rangos en los que se estima está contenido el camino.</li> <li>2. Medir las distancias entre los indicadores de ambos lados con un metro de precisión milimétrica.</li> <li>3. Durante toda la validación, observar tanto la parte frontal como la parte trasera.</li> <li>4. Enviar una misión que dure al menos 2 minutos y que tome la única bifurcación del mapa por lo menos una vez para cada lado.</li> <li>5. Verificar que el camino se haya mantenido dentro del rango indicado. En caso contrario, repetir los pasos anteriores con un rango mayor.</li> <li>6. Al tener ambos rangos y aproximar los trayectos como rectas, se obtiene que el centro del DUT estará dentro de un rango equivalente al promedio del rango frontal y el rango trasero.</li> <li>7. Verificar que el promedio de ambos rangos está dentro del rango establecido en PER-01.</li> </ol> | <p>Durante la misión, el camino se mantiene dentro de los indicadores montados en el DUT.</p> <p>El promedio de los rangos de los indicadores es menor a lo pedido en PER-01</p> |

|                                   |   |   |
|-----------------------------------|---|---|
| <p>T-TRAY-02<br/>Proto, Final</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado, conectado a internet y que la interfaz de usuario también.</li> <li>2. Elevar al DUT de manera que siga viendo la línea, pero no se pueda propulsar con sus motores</li> <li>3. Enviarle una misión simple al vehículo y esperar a que comience a moverse</li> <li>4. Ubicar algún elemento frente a la cámara de distinto color al camino, que bloquee la visión al camino.</li> <li>5. Esperar 5 segundos y verificar que el vehículo se detuvo, se encendió la señal luminosa esperada y que en la interfaz se recibió la notificación de que perdió la línea.</li> </ol>        | <p>El DUT se detiene y señala con la señal luminosa correspondiente. También lo indica en la interfaz de usuario.</p> |
| <p>T-AUTON<br/>Proto, Final</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que la batería esté cargada, conectar el DUT y verificar que esté conectado a internet.</li> <li>2. Montar una carga de al menos el peso máximo establecido en FUN-OP-03 sobre el DUT.</li> <li>3. Sobre el mapa del banco de pruebas, enviarle una misión al DUT que lo haga tomar la bifurcación una vez para cada lado como mínimo, y cuya duración temporal sea mayor a 25 minutos.</li> <li>4. Verificar que el vehículo se desplaza en todo momento, durante el transcurso de la misión.</li> <li>5. Verificar que la misión se completó de forma exitosa y que esta duró al menos 25 minutos.</li> </ol> | <p>El DUT se mantiene en movimiento durante el transcurso de la misión.</p>   |

*Tabla 9.3 Test de trayectoria simple*

| ID<br>Aplicabilidad  | Procedimiento  | Criterio  |
|--|--|---|
| <p><b>Procedimiento General:</b> Se conectará el DUT al Banco de pruebas sobre trayectoria, ubicándolo alineado con la trayectoria. Se deberá revisar que no haya ningún objeto sobre el trayecto que puede afectar a la lectura del camino o colisionar con el DUT.</p> |  |   |
| <p>T-MIS-01<br/>Proto, Final</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado a internet, y que la interfaz de usuario también esté conectada.</li> <li>2. Enviar una misión simple en la cual haya al menos una llegada a estación, una bifurcación que se tome para cada lado, y una bifurcación que se tome la unión.</li> <li>3. Verificar la señal lumínica que indica que se empezó con la misión</li> <li>4. Verificar que esté encendida la señal lumínica de vehículo en movimiento</li> <li>5. Al tomar una bifurcación, verificar que parpadea el guiño correspondiente tanto en su parte posterior como en su parte anterior. En el caso de una unión ambos guiños se deberán encender. Verificar también su señal sonora.</li> <li>6. Al llegar a una estación, verificar que se encienden ambos guiños sin parpadear.</li> <li>7. Verificar que en la interfaz de usuario se muestra correctamente el estado del DUT en la misión.</li> <li>8. Reiniciar el estado del DUT, reenviar una misión de las mismas características y realizar los pasos anteriores. Por último, verificar que acepta otra misión y empieza a realizarla</li> </ol> | <p>El DUT activa las señales especificadas en los momentos adecuados.</p> <p>El DUT realiza las misiones indicadas, y vuelve al mismo estado al terminarlas</p> |

|                                  |  |   |
|----------------------------------|--|---|
| <p>T-MIS-02<br/>Proto, Final</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado a internet, y que la interfaz de usuario también esté conectada. Elevar el DUT de manera que al mover sus ruedas no se propulse</li> <li>2. Enviar una misión simple, cuyo recorrido no tiene alguna restricción específica.</li> <li>3. Probar todas las combinaciones de pausado y continuado de misión por interfaz de usuario y con botones del tablero. En cada combinación verificar que se activen las señales luminosas correspondientes</li> <li>4. Abortar la misión por el tablero, volver a mandar otra y abortarla por la interfaz de usuario. Comprobar que se activen las señales correspondientes y que el vehículo funciona adecuadamente.</li> <li>5. Durante una misión pulsar el botón de emergencia. Verificar que se activa la señal correspondiente, y que se puede continuar tanto por la interfaz de usuario como por el botón de tablero</li> <li>6. Verificar en todo momento que la interfaz de usuario muestre correctamente el estado del vehículo en cuanto a: si está en emergencia, en falla, en misión, en pausa, la distancia que recorrió y el avance de las misiones.</li> <li>7. Por último, volver a posicionar el DUT en trayectoria con una misión, y accionar el dispositivo que desenergiza el vehículo por completo, y observar si el auto se detiene.</li> </ol> | <p>Las señales luminosas del DUT se encienden de acuerdo con lo descrito para cada situación</p> <p>Las funciones de pausado y abortado de misión funcionan correctamente</p> <p>Al accionar el interruptor mencionado se desenergiza el vehículo</p> |
|----------------------------------|--|---|

*Tabla 9.3 Test de misión simple*

| ID<br>Aplicabilidad   | Procedimiento  | Criterio  |
|---|--|---|
| <p><b>Procedimiento General:</b> Se conectará el DUT al <i>Banco de pruebas para misiones</i>, ubicándolo alineado con la trayectoria. Se deberá revisar que no haya ningún objeto sobre el trayecto que puede afectar a la lectura del camino o colisionar con el DUT.</p> |  |   |
| <p>T-MIS-03<br/>Proto, Final</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar que el DUT esté energizado y conectado a internet, y que la interfaz de usuario también esté conectada.</li> <li>2. Indicar a través de la interfaz de usuario una misión para la cual existan múltiples caminos, y se debe verificar que el camino que realiza el AGV es el más corto.</li> <li>3. Luego indicar una misión compleja de al menos dos bloques y que necesite acción humana en el tablero y a través de la interfaz de usuario para realizarse. Se debe cargar peso en alguna estación y retirarlo en otra.</li> <li>4. Verificar que el tablero indique cuando es necesario la intervención humana mediante una señal luminosa, y que la acción del humano efectivamente haga continuar la misión.</li> <li>5. Verificar que la interfaz de usuario indique cuando es la intervención humana a través de la interfaz, y que efectivamente al continuarlo a través de la interfaz el DUT continúe su misión.</li> <li>6. En todo momento observar que en la interfaz de usuario se muestre correctamente el estado de la misión, la posición estimada del DUT, si requiere alguna acción humana y el estado de la batería.</li> </ol> | <p>El DUT realiza el camino óptimo, interactuando de la manera descrita con los operadores.</p> <p>La información acerca del estado del DUT es mostrada correctamente en la interfaz de guiado.</p> |

Tabla 9.3 Test de misiones complejas

Se puede verificar que, en la siguiente tabla, todas las especificaciones que requerían un ensayo para su validación fueron contempladas. En la Figura 7-2 se puede observar el diagrama de PERT para los ensayos de validación:

| ID gráfico | ID del Ensayo | Ensayos predecesores | Especificación Validada                                       | Sobre el banco de pruebas |
|------------|---------------|----------------------|---|---------------------------|
| 1          | T-CAR-F       | -                    | DIM-01<br>DIM-02<br>SEG-02                                    | 1                         |
| 2          | T-B-COM       | -                    | INT-DAT1-01<br>INT-DAT1-02<br>FUN-OP-04                       | 2                         |
| 3          | T-B-DIA       | -                    | INT-DIA-01<br>INT-DIA-02                                      | 2                         |
| 4          | T-B-BAT       | T-B-COM              | FUN-OP-06<br>INT-DAT1-05                                      | 2                         |
| 5          | T-CTRL-VEL    | T-B-COM              | FUN-OP-02<br>FUN-OP-03<br>PER-05                              | 3                         |
| 6          | T-MANUAL      | T-CTRL-VEL, T-B-DIA  | INT-DIA-04  | 3                         |
| 7          | T-EST-CARGA   | T-MANUAL             | INT-MEC2-01   | 3                         |
| 8          | T-SETTLING    | T-MANUAL             | PER-04  | 3                         |
| 9          | T-TRAY-01     | T-CTRL-VEL           | PER-01  | 4                         |
| 10         | T-TRAY-02     | T-TRAY-01            | PER-03  | 4                         |
| 11         | T-AUTON       | T-TRAY-02<br>T-B-BAT | PER-02  | 4                         |
| 12         | T-MIS-01      | T-TRAY-02            | FUN-OP-07<br>INT-TAB-03<br>INT-TAB-06                         | 5                         |
| 13         | T-MIS-02      | T-MIS-01             | FUN-OP-05<br>INT-TAB-01<br>INT-TAB-02<br>INT-TAB-05<br>SEG-04 | 5                         |
| 14         | T-MIS-03      | T-MIS-02             | INT-DAT1-03<br>INT-TAB-04<br>INT-TAB-05<br>FUN-OP-01          | 5                         |

Tabla 9.3 Interdependencias de ensayos de validación

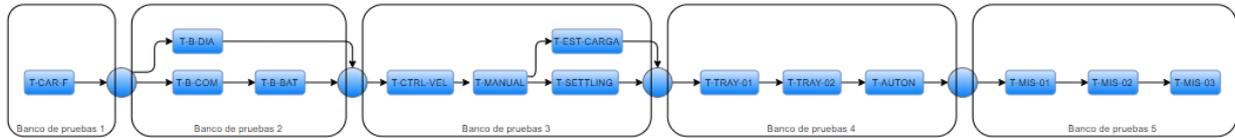


Figura 8-8 Diagrama PERT de ensayos de validación

### 8.3. Matriz de Trazabilidad de Validación

| Origen                | REQ ID<br>Descripción corta | ESP ID      | TEST ID o<br>SIM ID |
|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------------|
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-01                      | SEG-04      | T-MIS-02            |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-02                      | FUN-OP-05   | T-MIS-02            |
|                       |                             | SEG-07      | -                   |
| Cliente               | REQ-03                      | FUN-OP-06   | T-B-BAT             |
| Cliente               | REQ-04-M                    | PER-02      | T-AUTON             |
| Cliente               | REQ-05-M                    | FUN-OP-05   | T-MIS-02            |
|                       |                             | FUN-OP-06   | T-B-BAT             |
|                       |                             | FUN-OP-07   | T-MIS-01            |
| Cliente               | REQ-07-M                    | FUN-OP-03   | T-CTRL-VEL          |
|                       |                             | INT-MEC1-02 | -                   |
|                       |                             | INT-MEC2-01 | T-EST-CARGA         |
|                       |                             | INT-SEN-02  | -                   |
| Cliente               | REQ-08                      | DIM-01      | T-CAR-F             |
|                       |                             | DIM-02      | T-CAR-F             |
|                       |                             | SEG-01      | -                   |
|                       |                             | SEG-02      | T-CAR-F             |
| Cliente               | REQ-09                      | OPE-01      | -                   |
|                       |                             | OPE-02      | -                   |
|                       |                             | OPE-03      | -                   |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-10*                     | MAN-01      | -                   |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-12                      | SEG-05      | -                   |

|                       |          |             |            |
|-----------------------|----------|-------------|------------|
| Cliente               | REQ-15   | FUN-OP-05   | T-MIS-02   |
|                       |          | INT-DAT1-02 | T-B-COM    |
|                       |          | INT-DAT1-03 | T-MIS-03   |
| Cliente               | REQ-16   | FUN-OP-04   | T-B-COM    |
|                       |          | INT-DAT1-01 | T-B-COM    |
|                       |          | INT-DAT1-03 | T-MIS-03   |
| Cliente               | REQ-17   | INT-DAT1-04 | -          |
| Cliente               | REQ-18   | PER-01      | -          |
|                       |          | FUN-OP-02   | T-CTRL-VEL |
|                       |          | INT-SEN-02  | -          |
|                       |          | INT-SEN-03  | -          |
| Cliente               | REQ-20   | FUN-OP-01   | T-MIS-03   |
| Cliente               | REQ-21-M | FUN-OP-02   | T-CTRL-VEL |
|                       |          | PER-05      | T-CTRL-VEL |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-22   | PER-03      | T-TRAY-02  |
|                       |          | FUN-OP-02   | T-CTRL-VEL |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-23   | SEG-03      | -          |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-25   | INT-DIA-04  | T-MANUAL   |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-29   | INT-TAB-01  | T-MIS-02   |
|                       |          | INT-TAB-03  | T-MIS-01   |
|                       |          | INT-TAB-04  | T-MIS-03   |
|                       |          | INT-TAB-06  | T-MIS-01   |
| Cliente               | REQ-30   | INT-DIA-01  | T-B-DIA    |
|                       |          | INT-DIA-02  | T-B-DIA    |
|                       |          | INT-DIA-03  | -          |
|                       |          | MAN-02      | -          |
|                       |          | MAN-03      | -          |
|                       |          | MAN-04      | -          |
| Cliente               | REQ-31   | FUN-OP-08   | -          |
|                       |          | INT-TAB-01  | T-MIS-02   |
|                       |          | INT-TAB-05  | T-MIS-02   |

|                       |          |             |            |
|-----------------------|----------|-------------|------------|
|                       |          | MAN-02      | -          |
|                       |          | MAN-03      | -          |
|                       |          | MAN-04      | -          |
| Cliente               | REQ-33   | INT-TAB-02  | T-MIS-02   |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-34*  | MAN-01      | -          |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-35   | SEG-06      | -          |
| Cliente               | REQ-36-M | COS-01      | -          |
| Cliente               | REQ-37   | CON-01      | -          |
|                       |          | CON-02      | -          |
|                       |          | DIS-01      | -          |
| Cliente               | REQ-38   | PER-04      | T-SETTLING |
| Cliente               | REQ-39   | FUN-OP-01   | T-MIS-03   |
| ANSI/ITSDF B56.5-2019 | REQ-40   | INT-MEC1-01 | -          |
| Cliente               | REQ-41   | SEG-09      | -          |
|                       |          | SEG-08      | -          |

Tabla 9.5 Matriz de trazabilidad

En la matriz de trazabilidad, aquellas especificaciones que no están asociadas con un ensayo son validadas por documentación o inspección visual, según se especifique en las tablas de especificaciones.

## 9. Análisis de Factibilidad

### 9.1. Factibilidad tecnológica

#### 9.1.1. Esquema modular

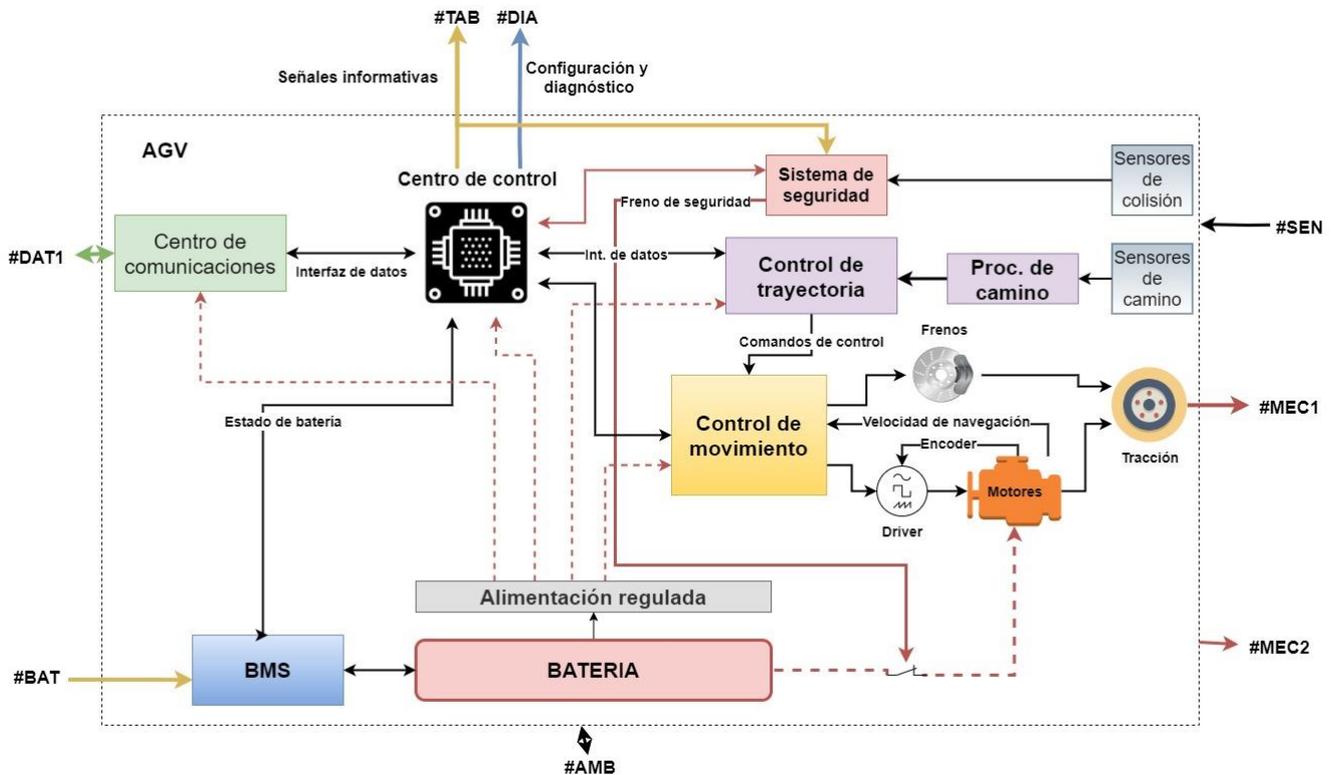


Figura 9-1 Diagrama modular

#### 9.1.2. Propuesta de alternativas de diseño

En la Figura 9-1 se puede observar la forma en la que se modularizó el sistema. A continuación, se explica la función que cumple cada uno de los módulos, se analizan distintas alternativas de diseño y se evalúan diferentes tecnologías disponibles.

Junto con el análisis de cada módulo se definen algunos conceptos físicos de movimiento y funcionalidad. Estos son necesarios para poder visualizar como opera el AGV y entender en detalle el funcionamiento de este. Los módulos que integran el sistema son:

- Centro de comunicaciones.
- Centro de control.
- Control de trayectoria
- Motores.
- Controlador de motores (Driver).
- Controlador de movimiento.
- Procesamiento de camino.
- Detección de camino.
- Sistema de seguridad.
- Batería.

En las siguientes tablas, se pone en evidencia las especificaciones técnicas de cada una de las distintas alternativas, para cada uno de los módulos a analizar.

#### *Centro de comunicaciones*

Para poder comunicarse con el AGV es necesario contar con un centro de comunicaciones que permita que las instrucciones lleguen desde el centro de mando al centro de control. Para ello se analizaron diversas tecnologías de redes inalámbricas que permitan esta comunicación. Las mismas pueden verse comparadas en la Tabla 9-1.

|                                     | Bluetooth              | UWB (Ultra Wide Band) | Zigbee                                   | Wi-Fi (802.11) |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|--|----------------|
| <b>Banda de frecuencia</b>          | 2.4 GHz                | 3.1 - 10.6 GHz        | 868/915 MHz; 2.4 GHz                     | 2.4 GHz; 5 GHz |
| <b>Máxima tasa de transferencia</b> | 1 Mb/s                 | 110 Mb/s              | 250 kb/s                                 | 54 Mb/s        |
| <b>Rango nominal</b>                | 10m                    | 10m                   | 10-100m                                  | 100m           |
| <b>Ancho de banda del canal</b>     | 1 MHz                  | 500 MHz - 7.5 GHz     | 0.3/0.6 MHz; 2 MHz                       | 22 MHz         |
| <b>Topología de conexión</b>        | Ad-hoc, redes pequeñas | Punto a punto         | Ad-hoc, puerto a puerto, estrella, o red | Point to HUB   |
| <b>Complejidad</b>                  | Alta                   | Media                 | Baja                                     | Alta           |
| <b>Consumo</b>                      | Medio                  | Bajo                  | Muy bajo                                 | Alto           |

Tabla 9-1 Tipos de redes inalámbricas

### *Centro de control*

El centro de control es el encargado de manejar el estado del AGV y administrar la misión que le fue asignada. Esto último no significa que debe realizar el proceso para el control de movimiento, velocidad o dirección del vehículo, sino que administra el estado general del vehículo.

Teniendo esto en cuenta, es claro que el centro de control tiene un impacto directo en el funcionamiento del vehículo. El proceso no requiere una capacidad de cómputo significativa, en comparación al proceso que se realizará para el control de trayectoria o el control de movimiento. Por otra parte, las interrupciones que maneja el sistema son de vital importancia, principalmente por cuestiones de seguridad. Por esto último, el manejo de interrupciones es una importante variable para tener en cuenta.

Dado el contexto y la funcionalidad que se le va a dar al diseño, los factores a la hora de seleccionar la tecnología de computación son la seguridad y confiabilidad de esta. Entonces, queda claro en este punto que la decisión más importante a realizar se basa en la robustez de la unidad de control, contemplando el costo que esto implique. Los parámetros que se deben tener en cuenta son:

- **Costo:** El valor de la tecnología seleccionada. Teniendo en cuenta que el diseño final será costoso, es importante destacar que dentro de la familia de controladores genéricos (comerciales de desarrollo), la diferencia entre una tecnología u otra, dentro de los parámetros antes mencionados, puede ser insignificante frente al costo total. Luego, en lo que respecta a microprocesadores industriales, el costo si será un factor más relevante, frente al costo total.
- **Robustez.**
- **Poder de procesamiento:** Si bien la administración general del equipo no exige una capacidad de procesamiento demasiado elevado, el vehículo debe ser capaz de responder ante una emergencia de forma prácticamente instantánea.
- **Manejo de interrupciones:** Siguiendo la lógica del ítem anterior, el centro de control debe ser capaz de manejar interrupciones de forma segura, para el caso de emergencias o cualquier otro evento que así lo requiera.
- **Eficiencia energética.**
- **Protocolos de comunicación:** Cuales son los protocolos de comunicación que este módulo soporta. Para la comunicación entre el centro de control y los demás periféricos, es importante que la unidad de control tenga la capacidad de soportar los protocolos standard.

#### *Control de trayectoria*

El control de trayectoria está encargado de comandar la navegación del vehículo. En otras palabras, tiene el objetivo de que el vehículo cumpla la misión que tiene asignada. En el caso de que ocurra algún evento que interrumpa la navegación, este debe ser capaz de recibir la orden del centro de control para detener la misión. La implementación de este debe ser capaz de realizar un mínimo procesamiento para los distintos estados en los que puede estar el vehículo, al ejecutar una misión. Debe comunicarse con el centro de control, el control de movimiento y el procesamiento de camino. Por último, debe poder manejar interrupciones y ser capaz de almacenar la serie de instrucciones que se deben realizar para completar una misión.

Debido a que los requerimientos para este bloque son básicamente los mismos que los especificados para el centro de control, se decidió que la implementación de este se iba a realizar con la misma solución que la del centro de control. Esto se debe a que se busca explotar los recursos de la forma más eficiente posible y a que se busca minimizar el costo del diseño.

#### *Tracción y dirección del AGV*

La aplicación requiere que el AGV sea capaz de trasladar una carga pesada a baja velocidad entre distintas estaciones de una planta. Este movimiento debe ser generado por motores eléctricos que deben producir suficiente torque en las ruedas del vehículo para que pueda acarrear el peso propio, el peso de la carga y además poder superar la fricción estática. Además, ya que el peso de la carga varía, es necesario poder regular el torque de los motores para lograr una misma velocidad para distintas cargas.

Para resolver este punto se debe decidir cuál es la topología de tracción del AGV. Cabe destacar que las diferentes topologías concluyen en parámetros de diseño alternativos, tanto para la construcción del

dispositivo y selección de tecnologías, como para el desarrollo del control del vehículo. A continuación, se puede observar una serie de alternativas para la implementación del vehículo.

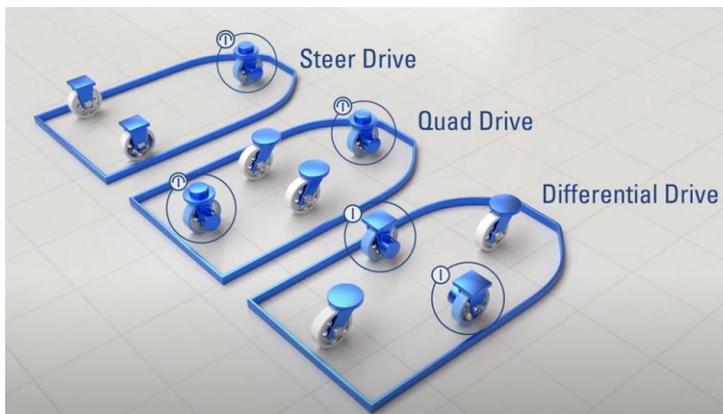


Figura 9-2 Topologías de construcción

Más allá de la topología del vehículo, es evidente que la forma en la que tracciona el vehículo requiere de al menos un motor. Además, por requerimiento este debe funcionar a base de energía eléctrica. Ya que existe una gran variedad de tecnologías de motores, se realiza un análisis de cada tecnología viable para la aplicación, con el fin de poder realizar una comparación entre ellos y obtener el más conveniente. [1] [2] [3]

| Alternativas de diseño | Costo                                     | Control (precisión)   |
|------------------------|---|---|
| <b>Motores DC</b>      | Bajo costo y amplia disponibilidad        | Controlador sencillo, pero no es fácil de implementar. Posee una zona muerta que afecta el control. Por sobre la zona muerta se consigue un control preciso, a bajas velocidades empeora la suavidad. |
| <b>BLDC</b>            | Costo elevado para la potencia requerida. | Controlador complejo. Requiere al menos 3 sensores de posición del rotor para controlar adecuadamente.  |
| <b>Stepper</b>         | Costo intermedio.                         | Control de posición muy preciso. No necesita realimentación para mantener velocidad y posición.   |
| <b>AC Sincrónico</b>   | Costo intermedio.                         | Control complejo para generar la onda senoidal. Perdida de precisión a bajas velocidades.   |

Tabla 9-2 Alternativas tecnológicas de motores

| Alternativas de diseño | Consumo y potencia                              | Linealidad de torque - velocidad                | Desgaste y vida útil                                    |
|------------------------|---|---|---|
| <b>Motores DC</b>      | Baja eficiencia (intermedia).                   | Curva de torque-velocidad lineal.               | Desgaste elevado. Requiere mantenimiento de escobillas. |
| <b>BLDC</b>            | Muy buena eficiencia.                           | Torque plano para un gran rango de velocidades. | No requiere mantenimiento. Larga vida útil.             |
| <b>Stepper</b>         | Baja eficiencia. Mala relación potencia-tamaño. | Torque dependiente de la velocidad.             | Larga vida útil.  |
| <b>AC Sincrónico</b>   | Muy buena eficiencia.                           | Torque y velocidad controlable con método V/f.  | Larga vida útil.  |

Tabla 9-3 Tecnologías de motores

Dependiendo de la tecnología que se termine utilizando y finalmente el motor que se elija, el controlador va a estar ligado a este. Es importante aclarar que el controlador del motor es un componente importante a la hora de seleccionar la opción final, ya que tiene un impacto directo en las variables analizadas. El modo de operación, el costo y las dimensiones del controlador pueden variar de forma apreciable entre distintas tecnologías. En la sección 9.1.3 se analiza en mayor detalle la selección realizada, teniendo en cuenta el motor que se utiliza.

#### *Control de movimiento*

Este módulo controla el movimiento físico del AGV. El movimiento físico se modela a partir de dos variables, la velocidad angular  $\omega$  y la velocidad lineal  $v$ . En la Figura 9-3 se puede observar un esquema que muestra la física del vehículo, siendo  $\dot{\theta}$  la velocidad angular y  $V$  la velocidad lineal.

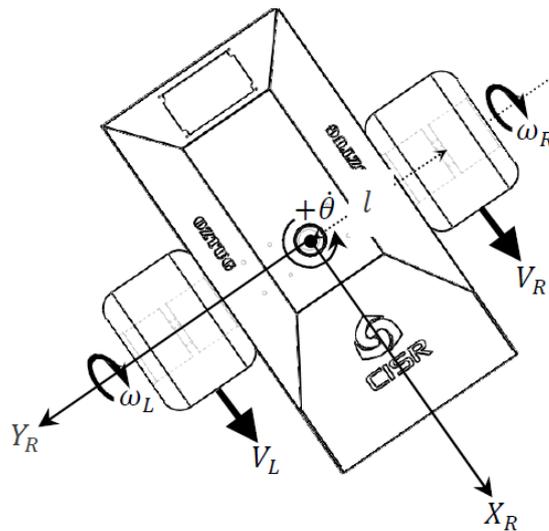


Figura 9-3 Física del AGV [4]

Con la definición del movimiento físico en mente y teniendo en cuenta el análisis que se hizo sobre la topología del vehículo en la subsección anterior, se puede determinar el alcance del módulo en cuestión. Este debe recibir los parámetros físicos de movimiento del módulo de control de trayectoria, procesarlos y finalmente generar las señales que comanden los motores (a través de sus respectivos controladores). Sobre esto es importante destacar que, para poder obtener un control seguro, sobre el movimiento físico del vehículo, este módulo debe poder realizar un control considerablemente rápido. Además, este debe implementar un control realimentado sobre los parámetros a controlar, de lo contrario el movimiento podría ser errático y la trayectoria podría separarse de la línea definida para la misma. De la misma manera que para el módulo del control de trayectoria, este se decidió que debía ser integrado en la computadora a bordo.

#### *Procesamiento de camino*

El procesamiento de camino es el encargado de procesar la información de trayectoria detectada, determinar la señal de error respecto a la trayectoria ideal, generar los parámetros de movimiento físico requeridos (velocidad angular  $\omega$  y la velocidad lineal  $v$ ) y finalmente indicar al módulo de control de trayectoria cualquier evento pertinente a la navegación. El error en la trayectoria quedará definido por la separación que haya desde el eje del vehículo al centro de la línea que marca el camino ideal. Luego, los eventos pertinentes a la navegación son los acontecimientos que marcan un avance en la misión del vehículo o una interrupción de esta. En la Figura 9-4 se puede observar la representación del error en la trayectoria. Luego, en la Figura 9-5 se pueden observar algunos ejemplos de los eventos que el módulo debe poder procesar.

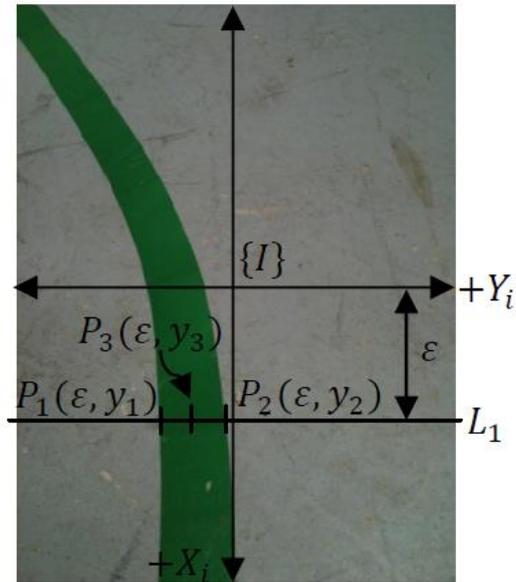


Figura 9-4 Error en la trayectoria del camino [4]

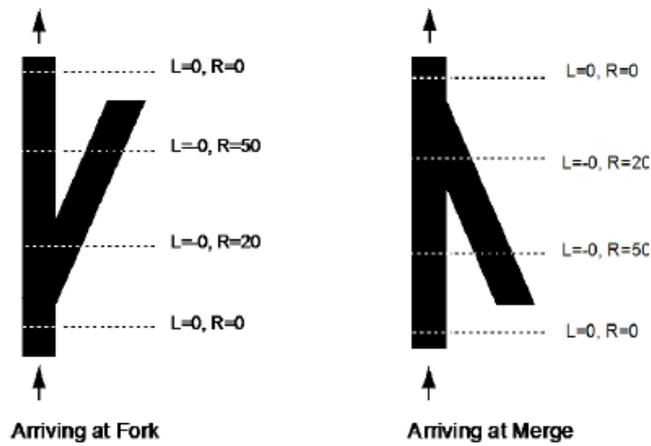


Figura 9-5 Eventos de trayectoria [5]

Este módulo, completará un segundo lazo de control, que definirá la trayectoria del vehículo. En la Figura 9-6 se puede observar cómo está compuesto el lazo de control que define la trayectoria de vehículo.

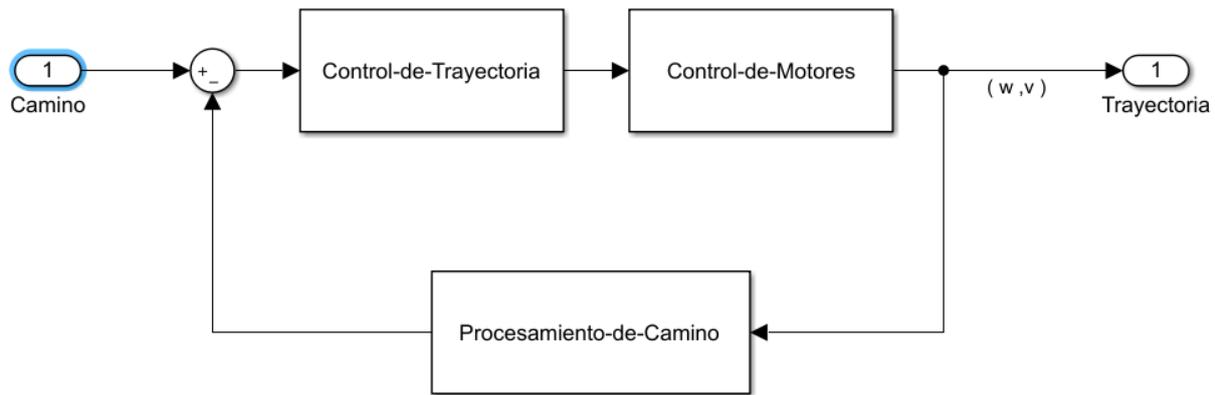


Figura 9-6 Lazos de control

En este caso, la entrada de este bloque de control será el error en la trayectoria. La referencia será cero, de forma que se busque alinear el eje del vehículo con la línea que marca la trayectoria. Por último, las salidas serán las variables físicas de movimiento velocidad angular  $\omega$  y la velocidad lineal  $v$ , definidas en la subsección anterior. Este módulo también estará integrado en la computadora a bordo.

#### *Detección de camino*

El sensor de camino es el encargado de medir la información que recibe el módulo de procesamiento de camino. Debe detectar la línea marcada en el piso, los *tags* al costado del camino y los eventos de trayectoria que pueden ocurrir durante una misión. Forma parte del lazo de control mencionado en el módulo de procesamiento de camino. En conjunto con dicho módulo generan la señal de error que hay entre el eje del vehículo y el centro de la línea. Es importante entender que el sensor mide el error y el módulo de procesamiento de camino recibe esta medición como parámetro para los cálculos pertinentes al lazo de control.

Para la implementación de este sensor, se analizaron las tres alternativas más comunes en el mercado:

- Óptico
- Magnético
- Laser (Infrarrojo)

Las tres tecnologías tienen capacidades similares. Se diferencian principalmente por su confiabilidad, precio y complejidad de implementación. En la Tabla 9-4 se puede observar una comparación de las distintas variables para tener en cuenta, a la hora de seleccionar una tecnología.

| Crterios  | Sensor Óptico   | Sensor Magnético  | Sensor Infrarrojo   |
|---|---|---|---|
| <b>Facilidad de implementación</b>                | La detección de la línea es compleja. Requiere de un significativo desarrollo de procesamiento. | Fácil de implementar, en general el sensor se conecta y no requiere una configuración adicional.    | La implementación no es sencilla. Hay muchas variantes de implementación y no son muy confiables. |
| <b>Posibilidad de que la solución sea exitosa</b> | Se puede asegurar que la solución es factible y se ajusta a los requerimientos del proyecto.    | La solución es muy confiable y se ajusta a los requerimientos del proyecto.                         | Existe la posibilidad de que esta solución no se ajuste a los requerimientos del proyecto.        |
| <b>Precisión de la medición</b>                   | Muy buena.  | Muy buena.  | Poco precisa y con poca definición.   |
| <b>Robustez</b>                                   | Es muy sensible a parámetros como la luminosidad. Más allá de esto, la lógica es muy confiable. | Es muy robusta. Los sensores disponibles en general tienen resuelta la lógica y son muy confiables. | Es sensible a múltiples factores físicos que pueden alterar la medición. No es confiable.         |
| <b>Ventajas del funcionamiento</b>                | La tecnología es versátil. Se pueden agregar diversas funcionalidades.                          | Simplifica el desarrollo de la solución y es muy confiable.   | Tiene un muy bajo costo.  |
| <b>Costo</b>                                      | Costo intermedio.   | Costo elevado.  | Bajo costo.   |

Tabla 9-4 Sensor de camino

### *Sistema de seguridad*

El sistema de seguridad tiene como objetivo prevenir daños a personas, objetos o incluso al mismo AGV. Para estos puntos existen diversas tecnologías que cuentan con desventajas y ventajas a analizar.

En primer lugar, para la prevención de daños al mismo AGV se pueden utilizar componentes de protección eléctrica para proteger a la batería. Un componente de protección es un fusible, que es un cable fino que se corta cuando pasa una corriente determinada. Es una solución barata, pero ante una corriente grande se debería cambiar el fusible para que el equipo continúe andando. Otro componente es un *polyswitch* y tiene una funcionalidad similar, pero permite volver a conducir al enfriarse. La tercera opción considerada es una llave termomagnética, que abre el circuito por corrientes pico y por sobreconsumo, y además es posible accionarla manualmente. La desventaja de la última es que es más costosa.

Para la prevención de daños a otros objetos o personas, es necesario un sistema de seguridad para comprobar que el microcontrolador principal no falló. Para ello se suelen utilizar periféricos llamados

*watchdogs* dentro de los mismos. También es necesario por requerimientos un botón que frene directamente los motores, de manera que operarios puedan frenar el vehículo. Estos botones pueden ser con retención para también señalar cuando terminó la emergencia, pueden ser normales abiertos o cerrados y su variedad reside en las tensiones y corrientes con las que trabajan.

Otros sistemas de seguridad para evitar colisiones que son utilizados comúnmente en AGVs comerciales son detectores de objetos y *bumpers*. Para detectar objetos, existen soluciones de luz infrarroja, LIDARs, ultrasonido o a través de procesamiento de imagen. Igualmente, los requerimientos para el diseño implican que el producto no tendrá un momento (masa multiplicada por velocidad) riesgoso y por ello no es necesario considerar un sistema de detección de objetos.

### *Batería*

La batería es uno de los componentes esenciales que determinan el rendimiento del vehículo. Es primordial que el AGV tenga el mayor tiempo de trabajo posible, por lo que es necesario reducir al mínimo el tiempo de carga de la batería y prolongar el tiempo entre recargas.

Un aspecto importante para considerar es la estrategia de carga que busca una empresa que emplea AGVs como método de transporte interno. Existen dos estrategias principales: por recambio de batería o con recarga oportunista. Una estrategia por recambio consiste en operar el vehículo hasta un nivel de batería determinado, momento en el cual el mismo se traslada a una zona donde manualmente se reemplaza la batería usada por una cargada. Esto requiere una segunda batería para vehículo como además un empleado a cargo de hacer el recambio. El método de recarga oportunista es más complejo ya que el AGV aprovecha los tiempos sin tareas pendientes para ir automáticamente a una estación de recarga y cargar la batería. Esta estrategia implica que el vehículo no opere mientras se carga, reduciendo el tiempo de disponibilidad del AGV. Sin embargo, algunas aplicaciones se diseñan para que se pueda interrumpir la carga si surge una nueva tarea. Por otro lado, el mismo es completamente autónomo y es posible coordinar varios vehículos (conociendo el tiempo de carga) para asegurar una fuerza operativa fija.

Cada tipo de batería impone distintas condiciones al diseño que deberán evaluarse según los requerimientos del proyecto. Aunque existen una gran cantidad de aspectos a considerar, debido a la aplicación se analizarán los siguientes: densidad gravimétrica, cantidad de ciclos de carga, corriente pico y corriente recomendada, mantenimiento requerido, seguridad y costo.

Dentro de las tecnologías disponibles en el mercado, se acota el análisis a aquellas que son factibles para el proyecto:

| Características               | Plomo ácido                | LiPo                                    | NiCd         | NiMH         |
|-------------------------------|----------------------------|---|--------------|--------------|
| Densidad gravimétrica (Wh/kg) | 30-50                      | 100-130                                 | 45-80        | 60-120       |
| Ciclos de recarga (al 80%)    | 200-300                    | 300-500                                 | 1500         | 300-500      |
| Mantenimiento                 | 3 a 6 meses                | 30 a 60 días                            | 60 a 90 días | No requerido |
| Seguridad                     | Estables. Bajas emisiones. | Requiere circuito de protección.        | Estables.    | Estables.    |
| Costo                         | Bajo                       | Alto. Con restricciones de importación. | Medio        | Medio        |

Tabla 9-5 Comparación de tipos de baterías. [6] [7]

### 9.1.3. Elección de una solución

A continuación, se justifican las elecciones de módulos para el producto final. Los módulos analizados son los mismos que los definidos en la sección anterior. Al igual que en el análisis de alternativas, aquí se hacen algunas aclaraciones acerca del funcionamiento de dichos bloques en base a las elecciones realizadas.

#### *Centro de comunicaciones*

Si bien existen muchas tecnologías de redes inalámbricas que permiten la comunicación entre el centro de mando y el centro de control, sólo un tipo cumple con las características necesarias para el ambiente industrial en el cual se encontrará el AGV.

La red inalámbrica elegida fue *Wi-Fi*. Esto se debe a que permite conexión en un área mucho mayor que las demás, que sólo permiten comunicarse en un rango de hasta 10m. Si bien *Zigbee* permite conexiones a una distancia similar a la de *Wi-Fi*, este tipo de red inalámbrica cuenta con tasas de transferencia de datos más baja, lo cual no sería favorable en el caso en que se quisiera plantear un esquema de múltiples AGV. Además, *Wi-Fi* nos permite poner múltiples enrutadores y poder cubrir zonas más grandes y/o con una mejor calidad de señal. Al mismo tiempo, *Wi-Fi* es un protocolo muy utilizado, lo cual brinda una gran variedad y disponibilidad en cuanto a dispositivos que permitan este tipo de comunicación. Por último, no por eso menos importante, las empresas ya cuentan con tecnología *Wi-Fi*, lo cual facilitaría la comunicación con el AGV, no teniendo que implementar un centro de mando que se comunique por medio de un protocolo nuevo, con el cual no se cuenta.

Al elegir esta tecnología, se tiene también que escoger el protocolo con el que se comunicará dentro de *Wi-Fi*. Dado que la red se necesita para enviar mensajes, se escogió utilizar MQTT. Este es un protocolo de código abierto para la comunicación de mensajes en una red ampliamente utilizado en el tópico de *Internet Of*

*Things*. Otra ventaja que presenta este protocolo es que requiere poca memoria y código, en comparación con otros. Además, su uso es simple debido a las librerías *open source* ya desarrolladas.

#### *Centro de control, control de trayectoria y control de movimiento*

Para la implementación de estos tres módulos, se optó por un microcontrolador que condense todas estas funciones en su software, aprovechando periféricos para estas aplicaciones. El dispositivo debe contar con protocolos de comunicación compatibles con los demás módulos y debe ser robusto para poder operar en un ambiente industrial. Además, dentro del microcontrolador también se halla una parte del sistema de seguridad, que será el watchdog.

Cabe mencionar que se escogió esta solución por sobre un PLC ya que era la que mejor balanceaba las variables de costo, seguridad, flexibilidad y robustez. El PLC si bien es robusto y alcanza las exigencias de los periféricos necesarios, el costo es muy elevado y la adición de nuevas características implica una complejidad que no justifica el beneficio para este producto.

#### *Procesamiento y detección de camino*

La tecnología que se implementó para el producto es la de detección óptica. Para este caso, la línea marcada en el piso que define la trayectoria es implementada con una cinta adhesiva. El material y color de la cinta puede variar, es necesario que sea suficientemente distinguible a la superficie donde se coloque. Luego, por medio de una cámara de video y procesamiento de imágenes, se detecta la distancia entre el eje de referencia del vehículo y el centro de la cinta, obteniendo así el error de trayectoria.

Esta tecnología no es la más utilizada en la industria. Sin embargo, no presenta mayores complicaciones de instalación, permite una disposición del recorrido flexible y económica y es segura. Además, el procesamiento que se requiere para poder detectar el camino y seguir una trayectoria exige un procesamiento dedicado, que tiene un costo considerable. Por ello se escoge que estos módulos estén juntos con un microprocesador ajeno al centro de control. A continuación, se ilustra un ejemplo de cómo queda una trayectoria del vehículo, implementada con esta tecnología.

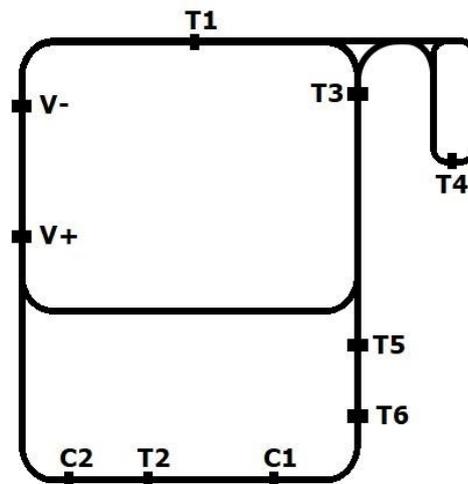


Figura 9-7 Trayectoria del camino

Además de la cinta que indica el camino a seguir, al costado del camino habrá *tags* que el vehículo será capaz de interpretar para obtener información sobre el camino, por ejemplo, para indicarle que llegó a una estación de trabajo, una estación de recarga o que se entró en una zona donde se debe disminuir la velocidad, entre otras. Estos *tags* también deben ser detectables de forma óptica.

#### *Sistema de seguridad*

Para lograr evitar que el vehículo genere daños a objetos, a personas o a sí mismo, se determina que el sistema de seguridad está conformado por los siguientes tres módulos:

- Llave termomagnética: Este módulo permite proteger a la batería de cortocircuitos y sobreconsumos eléctricos por parte del vehículo. Además, puede ser activado manualmente como un método de desenergización del vehículo.
- *Watchdog*: Este bloque verifica que el microprocesador no se encuentre en falla, y en el caso que lo esté, lo reinicia. La mayoría de los microcontroladores para este rubro cuentan con un *watchdog* integrado, por lo cual está incluido en este componente.
- Botón de emergencia con retención: Con este botón un operario puede indicar que hay una emergencia y que la misma no finalizó hasta que se libere el botón. Existen distintos tipos de botón de acuerdo diferenciados mayoritariamente por la corriente que permiten pasar, si son normales abiertos o cerrados y el tiempo de vida útil.

Por último, se menciona que por su costo no se consideraron los *bumpers* ni otros sensores de detección de objetos como los nombrados. El vehículo tiene una velocidad máxima relativamente baja y transporta cargas ligeras en comparación a otros AGVs comerciales, por lo que no es un requerimiento que tenga un sistema de detección de objetos. Sin embargo, al utilizar una cámara para el procesamiento de camino, se puede procesar la imagen para detectar objetos en el camino, pero desafortunadamente conlleva un tiempo de desarrollo apreciable y se decide no implementarlo.

### Tracción y dirección del AGV

La topología que se escogió fue la diferencial. o se debe principalmente a los beneficios constructivos, simplicidad del control del vehículo y potencia de operación de los motores que implica esta alternativa. La topología diferencial permite el control dos motores en el centro del vehículo, alineados en el eje horizontal. En la Figura 9-8 Topología seleccionada Figura 9-8 se puede observar cómo queda la disposición de los motores.

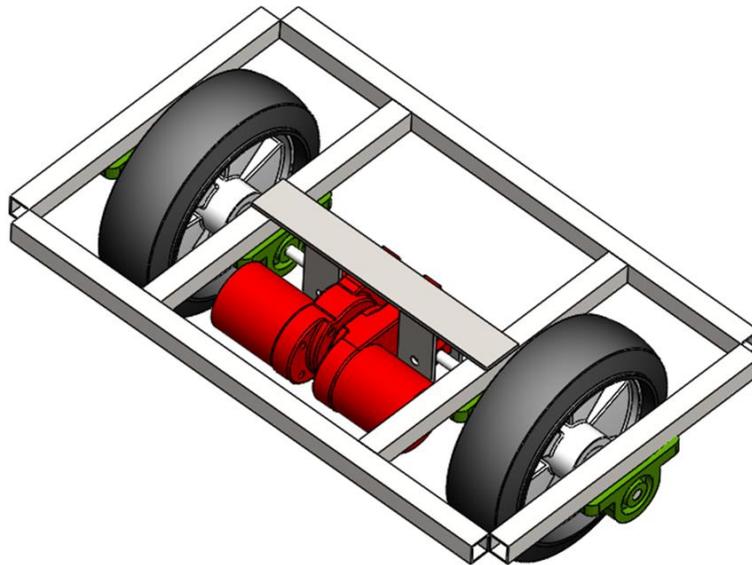


Figura 9-8 Topología seleccionada

Teniendo en cuenta esta configuración, la forma en que controla la velocidad angular  $\omega$  y la velocidad lineal  $v$ , es a través de la velocidad angular de cada motor. Luego, las ecuaciones que determinan las variables de movimiento del vehículo son:

$$v = \frac{-r\omega_L}{2} + \frac{r\omega_R}{2} \quad 9-1$$

$$\omega = \frac{-r\omega_L}{2l} + \frac{-r\omega_R}{2l} \quad 9-2$$

Siendo  $v$  la velocidad lineal,  $\omega$  la velocidad angular,  $\omega_L, \omega_R$  la velocidad angular de las ruedas izquierda y derecha respectivamente,  $r$  el radio de las ruedas y  $l$  la distancia de la rueda al centro del vehículo.

Para el producto se decidió utilizar unos motores DC por su bajo costo respecto de los BLDC y también por la disponibilidad en el mercado local. Estos motores requieren de un control sencillo y cuentan con una curva de torque-velocidad lineal. Si bien no son ideales por presentar desgaste con el uso continuo, el bajo costo justifica esta selección.

Un detalle para considerar es que, para utilizar este tipo de motores, es necesario contar con una caja de reducción. Esto es debido a que estos motores deben operar a velocidades altas para optimizar el torque que entregan a las ruedas. Además, así se evitan movimientos bruscos en el control y esfuerzos sobre el eje del motor que podrían dañarlo.

Como fue mencionado en la Sección 9.1.2, el controlador de los motores está ligado a los motores que se elijan y a la potencia con la que se operen los motores. En la Sección 10 se analiza en detalle el controlador utilizado para el producto.

#### *Batería*

Se conoce que el objetivo del producto final es que sea capaz de operar durante una jornada laboral normal, dándole tiempo durante la noche para cargar. Por lo tanto, el método de recarga por recambio de batería sería más adecuado. Además, esto implica que el producto que se diseñará no necesita tener la capacidad de hacer carga rápida, algo esencial en sistemas de recarga oportunista.

Considerando esto, la tecnología de plomo ácido resulta ser más adecuada tomando en cuenta el costo, la seguridad y disponibilidad de este tipo de baterías en comparación con las otras tecnologías.

9.1.4. DFMEA

En la Figura 9-9 se detalla la DFMEA del proyecto.

| N° | Efectos de la falla   | Modo de la falla  | Causas de la falla                             | Aceptabilidad |    |    |    | Acción de reducción/Prevención del riesgo                    | Aceptabilidad |    |    |    | Referencia |
|----|---|---|--|---------------|----|----|----|--|---------------|----|----|----|------------|
|    |   |   |  | NS            | PO | DE | IC |  | NS            | PO | DE | IC |            |
| 1  | No se puede utilizar el equipo  | El vehículo no avanza   | Motores dañados                                | 4             | 2  | 3  | 24 |  |               |    |    |    |            |
| 2  | No se puede utilizar el equipo  | El vehículo no avanza   | Batería descargada                             | 3             | 4  | 4  | 48 | Detector de carga batería                                    | 3             | 4  | 1  | 12 |            |
| 3  | No se puede utilizar el equipo  | El vehículo no avanza   | Eje de transmisión roto                        | 4             | 2  | 3  | 24 |  |               |    |    |    |            |
| 4  | El usuario no percibe las luces testigo                                   | El vehículo no muestra señales luminicas                        | Luces dañadas                                  | 3             | 3  | 1  | 9  |  |               |    |    |    |            |
| 5  | El usuario no percibe los sonidos indicativos                             | El vehículo no da señales sonoras                               | Buzzer roto                                    | 3             | 3  | 2  | 18 |  |               |    |    |    |            |
| 6  | El vehículo no trabaja en modo autónomo                                   | El vehículo requiere operación manual                           | Transmisor wifi defecutoso                     | 4             | 2  | 3  | 24 |  |               |    |    |    |            |
| 8  | El usuario percibe que el vehículo está raspando el piso                  | Una pieza de la estructura está caída y en contacto con el piso | Estructura desoldada                           | 4             | 2  | 2  | 16 |  |               |    |    |    |            |
| 9  | No se puede utilizar el equipo  | El vehículo no avanza   | Microcontrolador dañado                        | 4             | 3  | 3  | 36 | Microcontrolador de grado industrial                         | 4             | 2  | 3  | 24 |            |
| 10 | El usuario no puede detener el vehículo utilizando el botón de emergencia | El botón de emergencia no responde                              | Botón de emergencia roto                       | 5             | 3  | 3  | 45 | Botón de emergencia industrial                               | 5             | 1  | 3  | 15 |            |
| 11 | El vehículo sale del estado de parada de emergencia                       | El botón de emergencia se libera de su posición de presionado   | El botón tiene su traba defectuosa             | 5             | 3  | 4  | 60 | Botón de emergencia con retención                            | 5             | 2  | 2  | 20 |            |
| 12 | El vehículo se detiene indebidamente                                      | El sensor detecta objetos donde no debería                      | Colocación incorrecta del sensor anticollisión | 4             | 3  | 2  | 24 |  |               |    |    |    |            |
| 13 | El vehículo se detiene indebidamente                                      | Cámara no detecta trayectoria                                   | Línea de trayectoria borrada                   | 3             | 4  | 2  | 24 |  |               |    |    |    |            |
| 14 | El vehículo se desvía de la trayectoria                                   | Cámara lee incorrectamente la trayectoria                       | Línea de trayectoria borrada                   | 5             | 4  | 2  | 40 | Mejora de detección del algoritmo de procesamiento de camino | 5             | 2  | 2  | 20 |            |
| 15 | El equipo sufre retrasos en ejecutar acciones                             | El código tarda en ejecutar el resultado deseado                | Código complejo                                | 3             | 3  | 3  | 27 |  |               |    |    |    |            |
| 17 | El vehículo no sigue la trayectoria                                       | El vehículo avanza de forma errática                            | Goma pinchada                                  | 4             | 3  | 2  | 24 |  |               |    |    |    |            |

| Severidad          | Probabilidad  | Detectabilidad |   |
|--------------------|---------------|----------------|---|
| insignificante     | remota        | completa       | 1 |
| poco significativo | poco probable | mayor          | 2 |
| moderado           | media         | moderada       | 3 |
| grave              | alta          | pequeña        | 4 |
| muy grave          | muy alta      | mínima         | 5 |

| Nivel de IC                         |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Aceptable                           | IC ≤ 27      |
| Bajar hasta razonablemente práctico | 27 < IC < 48 |
| No aceptable                        | IC ≥ 48      |

|                |  |
|----------------|--|
| Participantes: | Javier Kipen , Marcos Brito Devoto , Agustín Goytia , Sebastián Milhas |
|----------------|--|

Figura 9-9 DFMEA de diseño modular

9.2. Factibilidad de tiempos

Se diseñó un plan temporal del proyecto, con la herramienta de planificación Microsoft Project. Dicho proyecto se divide en cuatro etapas principales:

- Definición de requerimientos, especificaciones y validación.
- Análisis de factibilidad.
- Desarrollo del producto y construcción del prototipo.
- Validación del prototipo.

Luego, al definir todas las tareas y asignar los tiempos de cada una, se obtiene el siguiente diagrama temporal general:

| ID  | Task Name  | 19      |     |         |     |     | Qtr 4, 2019 |     |     | Qtr 1, 2020 |     |  | Qtr 2, 2020 |  |
|-----|--|---------|-----|---------|-----|-----|-------------|-----|-----|-------------|-----|--|-------------|--|
|     |  | Aug     | Sep | Oct     | Nov | Dec | Jan         | Feb | Mar | Apr         | May |  |             |  |
| 0   | <b>AGV-ITBA</b>  |         |     |         |     |     |             |     |     |             |     |  |             |  |
| 1   | Hito 1 - Introducción, objetivos, definición del producto y plan de validación | [Barra] |     |         |     |     |             |     |     |             |     |  |             |  |
| 2   | Hito 2 - Análisis de factibilidad  |         |     | [Barra] |     |     |             |     |     |             |     |  |             |  |
| 3   | <b>Hito 3 - Ingeniería en detalle</b>  |         |     |         |     |     | [Barra]     |     |     |             |     |  |             |  |
| 117 | <b>Hito 4 - Prueba y validación</b>  |         |     |         |     |     |             |     |     | [Barra]     |     |  |             |  |
| 122 | Presentación   |         |     |         |     |     |             |     |     | [Barra]     |     |  |             |  |

Figura 9-10 Diagrama temporal general

### 9.2.1. Planificación (PERT)

En la Figura 9-11 se puede observar un diagrama de planificación PERT con una serie de tareas globales. En la Tabla 9-6 se puede observar una tabla que detalla la información de cada una de estas tareas. Si bien estas no son las tareas de más bajo nivel, reflejan el camino crítico y una estimación temporal de las diferentes etapas del proyecto.

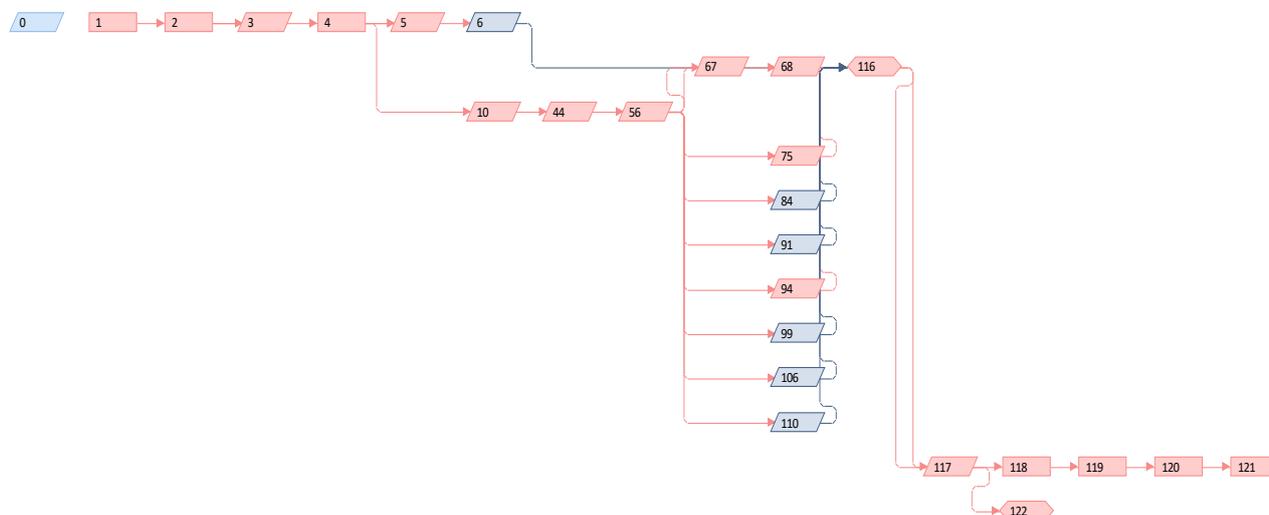


Figura 9-11 Planificación PERT

| ID  | Nombre de tarea  | Comienzo     | Final        |
|-----|--|--------------|--------------|
| 0   | AGV-ITBA   | Mon 2/9/19   | Tue 5/5/20   |
| 1   | Hito 1 - Introducción, objetivos, definición del producto y plan de validación | Mon 2/9/19   | Fri 11/10/19 |
| 2   | Hito 2 - Análisis de factibilidad  | Mon 14/10/19 | Fri 13/12/19 |
| 3   | Hito 3 - Ingeniería en detalle   | Mon 16/12/19 | Tue 17/3/20  |
| 4   | Diseño y planificación de módulos  | Mon 16/12/19 | Fri 20/12/19 |
| 5   | Compra de materiales   | Mon 23/12/19 | Thu 13/2/20  |
| 6   | Estructura mecánica del AGV  | Mon 23/12/19 | Wed 15/1/20  |
| 10  | Definiciones de <i>hardware</i>  | Mon 23/12/19 | Mon 20/1/20  |
| 44  | Compra y envío de  | Tue 21/1/20  | Fri 7/2/20   |
| 56  | Pruebas sobre materiales   | Mon 10/2/20  | Thu 13/2/20  |
| 67  | Desarrollo de <i>hardware</i> y <i>software</i>                                | Fri 14/2/20  | Tue 17/3/20  |
| 68  | Sistema de seguridad   | Fri 14/2/20  | Thu 27/2/20  |
| 75  | Centro de comunicaciones   | Fri 14/2/20  | Tue 17/3/20  |
| 84  | Centro de control  | Fri 14/2/20  | Fri 13/3/20  |
| 91  | Control de trayectoria   | Fri 14/2/20  | Fri 6/3/20   |
| 94  | Procesamiento de camino  | Fri 14/2/20  | Tue 17/3/20  |
| 99  | Controlador de movimiento  | Fri 14/2/20  | Fri 6/3/20   |
| 106 | Interfaz de usuario  | Fri 14/2/20  | Wed 4/3/20   |
| 110 | Módulo de energía  | Thu 27/2/20  | Wed 4/3/20   |
| 116 | Se puede probar el conjunto  | Tue 17/3/20  | Tue 17/3/20  |
| 117 | Hito 4 - Prueba y validación   | Wed 18/3/20  | Tue 5/5/20   |
| 118 | Prueba de operación manual   | Wed 18/3/20  | Mon 23/3/20  |
| 119 | Validación de operación manual   | Tue 24/3/20  | Wed 1/4/20   |
| 120 | Prueba de operación autónoma   | Thu 2/4/20   | Wed 15/4/20  |
| 121 | Validación de operación autónoma   | Thu 16/4/20  | Tue 5/5/20   |
| 122 | Presentación   | Tue 5/5/20   | Tue 5/5/20   |

Tabla 9-6 Definición de tareas

### 9.2.2. Programación (Gantt)

El diagrama de Gantt contiene una gran cantidad de tareas. En las siguientes figuras se detalla el resultado de este, para las etapas de ingeniería en detalle y validación. Estas etapas son las de mayor interés a la hora de la planificación ya que las etapas iniciales no tienen una gran cantidad de tareas ni dependencias complejas. El diagrama se presenta separado en sus tareas globales, vistas en la Tabla 9-6, ya que la cantidad de tareas lo hace muy extenso.

*Elección del Hardware para utilizar:*

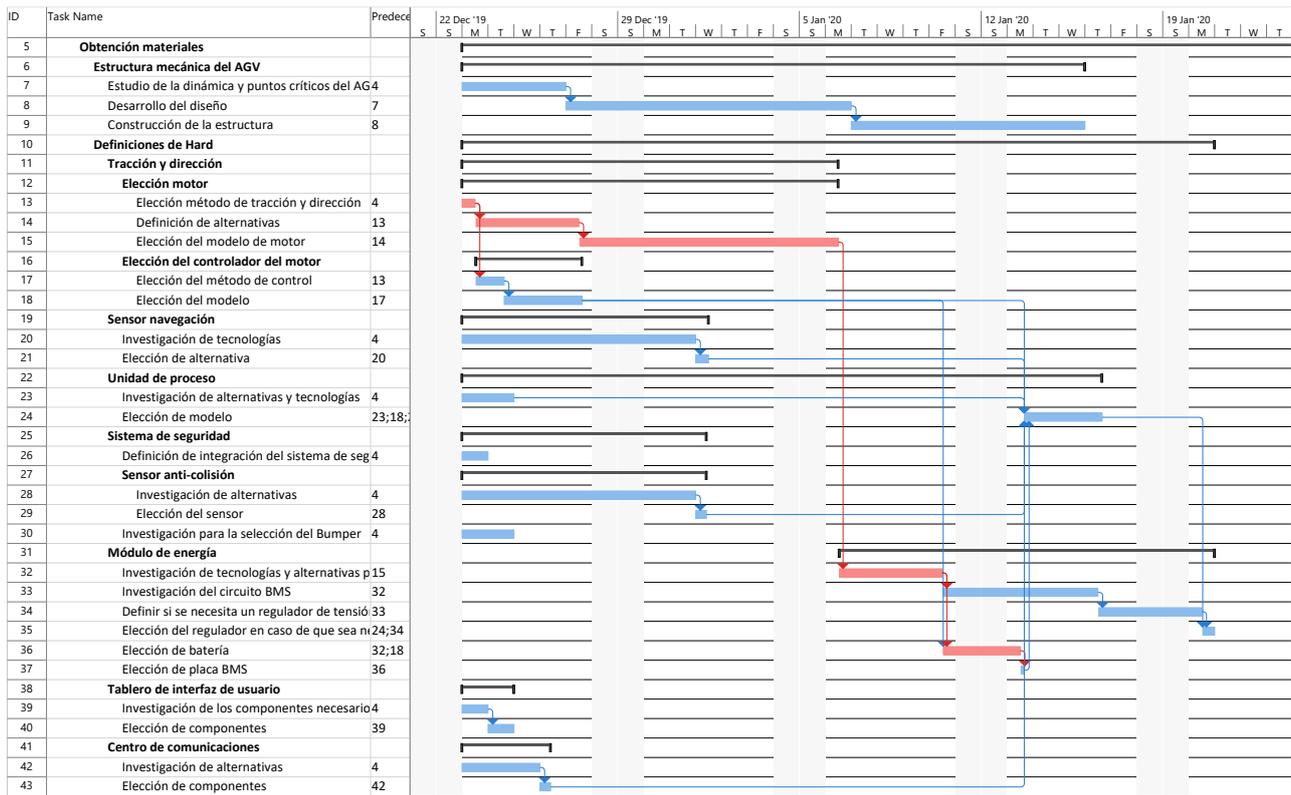


Figura 9-12 Elección del HW a utilizar

Obtención y prueba de materiales:

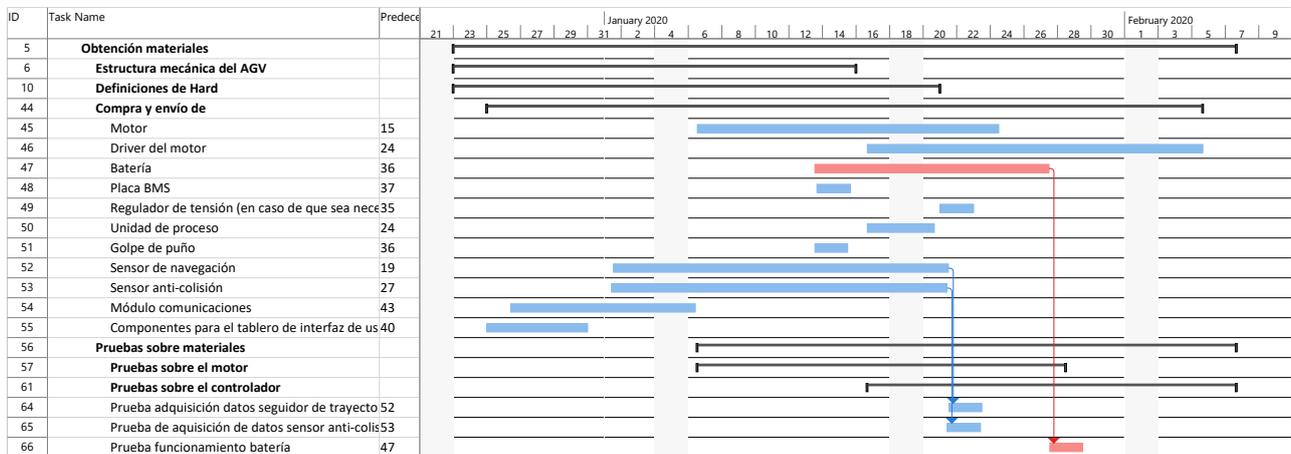


Figura 9-13 Obtención y prueba de material

Desarrollo de Software y Hardware:

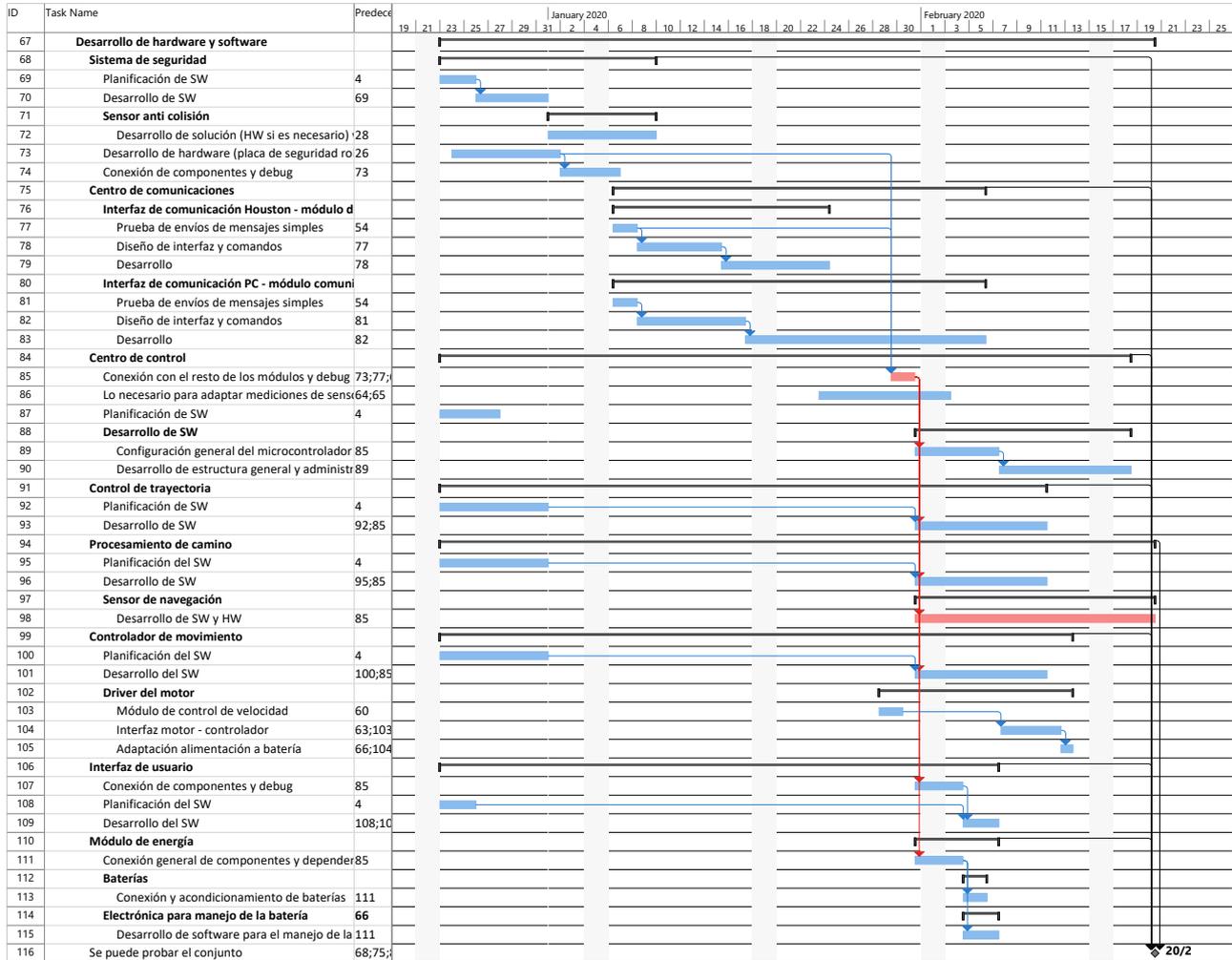


Figura 9-14 Desarrollo de Software y Hardware

Pruebas y validación:

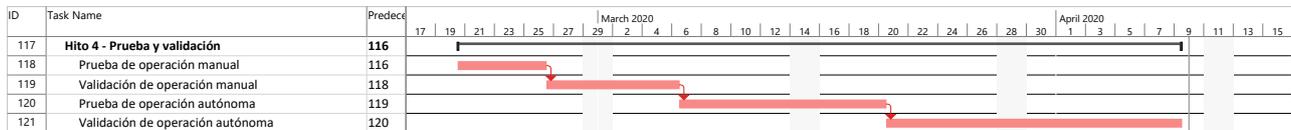


Figura 9-15 Pruebas modulares y validación

Como se puede observar en la planificación, el proyecto tiene una duración estimada de nueve meses. Cabe aclarar que, para el desarrollo en cuestión, este resultado sirve como referencia, pero no debe tomarse de forma determinante. Al ser un proyecto académico, los recursos disponibles para llevarlo a cabo varían en el tiempo y terminan impactando en la ejecución de las tareas. Mas allá de esto, la planificación obtenida sí puede dar un resultado más cercano a la realidad, para el caso en que el proyecto se lleve a cabo en el ámbito de una compañía.

Adicionalmente, durante el desarrollo ocurrió la pandemia COVID-19. Esta situación derivó en atrasos en la planificación principalmente debido a:

- Las reuniones presenciales fueron desaconsejadas por meses como método de evitar la propagación del virus.
- El impacto en la economía llevó a que la empresa que iba a financiar el proyecto se retracte, por lo que se tuvo que reestructurar el financiamiento.
- El instrumental electrónico necesario para el desarrollo permaneció en la universidad, la cual estaba cerrada. El tiempo hasta que se pudo retirar demoró las pruebas sobre el hardware.

### 9.3. Factibilidad económica. (Mercado, costos, ciclo de vida, VAN, TIR)

#### 9.3.1. Modelo de Negocios

El modelo de negocios que se plantea para este proyecto consiste en un esquema clásico de venta de productos, principalmente en línea por medio de una página de internet propia. El enfoque de la venta está realizado hacia las empresas y, excepcionalmente, a usuarios particulares.

Este análisis de mercado está basado en una tesis de maestría en administración de negocios de la Universidad de San Andrés [8].

En este estudio se indica que en el año 2015 las ventas de AGVs mundiales rondaron las 14.000 unidades, y que se estimaba que habría un aumento del 200% para el año 2025. Sin embargo, en lo que a la Argentina respecta, no es fácil realizar una estimación ya que no existe una gran cantidad de fabricantes locales, sino que la gran mayoría se dedica a importar AGVs. A esto se suma el hecho de que estos dispositivos se importan utilizando una posición arancelaria que también incluye a otros equipos de movimiento de materiales, lo cual implica que no es posible identificar el volumen de importación de forma directa. Sin embargo, considerando la cantidad de empresas de grado industrial que se verían favorecidas por estos dispositivos, junto con las cantidades anuales vendidas de autoelevadores y equipos eléctricos de movimiento de materiales y, asumiendo que sólo un 10% de estas cantidades sería adoptado por las empresas para la incorporación de soluciones autónomas del estilo de los AGV, el estudio indica que para 2021 se podría contemplar un volumen de venta anual de AGVs en todo Argentina de 403 unidades. Este estudio es sumamente conservador ya que los valores de ventas de los cuales se parte son de las cantidades vendidas en 2006. De esta manera, considerando una participación de mercado del 10%, se podría estimar una venta de 40 unidades anuales en la Argentina.

Finalmente, se plantea un sistema de suscripción anual por cada AGV vendido, el cual incluiría beneficios tales como un servicio técnico personalizado, un AGV de reemplazo mientras la unidad se encuentra en reparación (para lo cual se producirán 10 unidades adicionales que no serán vendidas), actualizaciones de software y repuestos, configuración de la unidad específicamente para el establecimiento del cliente tanto al momento de la compra como en futuras reconfiguraciones, entre otras necesidades específicas que puedan acordarse con cada cliente.

## 9.3.2. Costos

En lo que a costos respecta, nos encontramos con diversas formas de gastos. Por un lado, se encuentra el costo de los materiales para construir el AGV, los cuales se detallan en la Tabla 9-7 .

| Parte                             | Valor en dólares (US\$) |
|-----------------------------------|-------------------------|
| <b>Encoders</b>                   | 2,67                    |
| <b>Bulones</b>                    | 2,91                    |
| <b>Tuercas</b>                    | 4,03                    |
| <b>Pulsadores LED</b>             | 4,92                    |
| <b>Cable RS232</b>                | 6,19                    |
| <b>Llave termomagnética</b>       | 7,74                    |
| <b>Pintura</b>                    | 8,84                    |
| <b>Conversores RS232, RS485</b>   | 9,01                    |
| <b>Botón Parada de Emergencia</b> | 9,04                    |
| <b>WeMos D1</b>                   | 9,27                    |
| <b>Ruedas de base giratoria</b>   | 11,71                   |
| <b>Cinta adhesiva</b>             | 17,25                   |
| <b>Tiras LED + Envío</b>          | 18,81                   |
| <b>Soportes de eje</b>            | 25,82                   |
| <b>Caños 25x25x1,6</b>            | 28,50                   |
| <b>Ruedas</b>                     | 32,51                   |
| <b>Batería 12V</b>                | 37,51                   |
| <b>Open MV</b>                    | 96,29                   |
| <b>CIAA NXP</b>                   | 360,00                  |
| <b>Motores + controladores</b>    | 386,00                  |
| <b>Subtotal partes</b>            | 1.079,04                |

Tabla 9-7 Costos de materiales

Adicionalmente, para fabricar el AGV se tomó en consideración el costo por el tiempo invertido, el cual se estimó en función de las horas de diseño y armado, y de un sueldo de ingeniero *junior*. Por un lado, las horas de diseño se consideraron como un estimativo de 8 horas de trabajo, 2 veces por semana, las 4 semanas del mes, durante 8 meses por 4 personas, resultando así en un gasto aproximado de US\$ 10.801. Por otra parte, las horas de armado se estimaron de la cantidad de veces que el equipo se juntó para fabricar el AGV, resultando en aproximadamente 8 horas de trabajo durante 11 días por 4 personas, dando como resultado un valor aproximado de US\$ 1.856. La suma de las horas de diseño y las horas de armado dan como resultado un total aproximado equivalente de US\$ 12.657.

En la inversión inicial también se incluyeron todos aquellos materiales necesarios para iniciar una empresa que permita la fabricación de AGVs, a saber: soldadora, taladro de banco, amoladora, kits de herramientas de mano, osciloscopio, elementos de protección personal, mesas de trabajo, asientos, y notebooks.

Al realizar el cálculo de los gastos también se consideraron los costos de generar una página de internet, junto con los costos asociados para conformar la sociedad de trabajo, sobre la cual se desarrollará en la sección de factibilidad legal.

Finalmente, se contempló una inversión inicial de capital correspondiente a, por un lado, los 10 AGVs que se fabrican para conservar en stock para la reposición inmediata a aquellos clientes que deban realizar una reparación en su unidad, lo cual genera un gasto de US\$ 10.790. A esto se le suma la intención de contar con el capital suficiente para poder mantener el funcionamiento de la empresa durante un tiempo equivalente a 4 meses de no producción, implicando así un costo de US\$ 31.303 y, finalmente, se contempla el capital necesario para afrontar la pérdida resultante en el primer año de US\$ 13.384. De esto resulta, basándonos en el cuadro de resultados que se analizará más adelante, una inversión en materia de capital de US\$ 55.478. Es así como la inversión total inicial se estima en US\$ 75.775, lo cual se representa en la Tabla 9-8.

| <b>Objeto</b>                                 | <b>Valor en dólares (US\$)</b> |
|---|--------------------------------|
| <b>Horas de ingeniería de diseño + armado</b> | 12.657,37                      |
| <b>Página Web</b>                             | 113,42                         |
| <b>Soldadora + máscara</b>                    | 533,06                         |
| <b>Taladro de banco</b>                       | 226,83                         |
| <b>Mesa de trabajo x5</b>                     | 2.069,81                       |
| <b>Amoladora</b>                              | 283,54                         |
| <b>Kit herramientas x2</b>                    | 907,34                         |
| <b>Kit seguridad</b>                          | 152,21                         |
| <b>Taladro de mano</b>                        | 170,13                         |
| <b>Bancos</b>                                 | 102,08                         |
| <b>Notebook</b>                               | 1.701,26                       |
| <b>Osciloscopio</b>                           | 453,67                         |
| <b>Prototipo</b>                              | 810,00                         |
| <b>Conformación de la sociedad</b>            | 116,75                         |
| <b>Inversión de capital</b>                   | 55.478,02                      |
| <b>Total de inversión</b>                     | 75.775,47                      |

*Tabla 9-8 Inversión inicial del proyecto*

En materia de costos también es debido analizar los costos fijos y variables del proyecto.

Los costos fijos se estiman en base a los salarios del personal contratado y el alquiler del espacio de trabajo. En el caso particular de este proyecto, se decidió contar con cuatro ingenieros junior (correspondiente a los cuatro jóvenes ingenieros que desarrollaron el proyecto), una persona de administración, un contador y tres mecánicos. Para el espacio de trabajo, se proyectó un espacio de trabajo de aproximadamente 1000m<sup>2</sup>, el cual contaría con techo.

Adicionalmente, con la finalidad de contar con un ingeniero de mantenimiento que pueda destinar su tiempo exclusivamente al mantenimiento de los AGVs vendidos y así brindar a los clientes los beneficios asociados a la suscripción, se contempló que, en el tercero, quinto y octavo año, se incorpora un nuevo ingeniero de mantenimiento de tiempo completo, dando un total de tres ingenieros adicionales en el décimo año. Esto implica que los gastos fijos aumentarán en US\$ 10.888 por cada nuevo ingeniero contratado, lo cual genera un costo asociado por suscripción. De esta forma, y con el fin de establecer un promedio de gastos fijos a lo largo del proyecto, se obtiene un valor promedio de gastos fijos de US\$ 112.438.

El resumen de costos fijos se puede apreciar en la Tabla 9-9.

| Concepto de gasto (anual)           | Valor en dólares (US\$) |
|-------------------------------------|-------------------------|
| <b>Sueldo ingeniero junior (x4)</b> | 43.552,23               |
| <b>Sueldo Administrativo</b>        | 6.805,04                |
| <b>Contador</b>                     | 8.166,04                |
| <b>Sueldo mecánico (x3)</b>         | 20.415,11               |
| <b>Alquiler galpón (1000m2)</b>     | 14.971,08               |
| <b>Total de gastos fijos</b>        | 93.909,49               |

*Tabla 9-9 Gastos fijos del proyecto*

Respecto a los costos variables, estos corresponden principalmente al costo de los materiales para fabricar un AGV, sin embargo, también se consideró oportuno un gasto en publicidad el cual, basándonos en la U.S. Small Business Administration, se asumió de un 5% sobre el valor de la ganancia obtenida por las ventas. De esta forma, los gastos variables se resumen en US\$ 1.079,04 por parte del costo de los materiales, los cuales se analizaron al ver el costo inicial de inversión, y US\$ 150 por parte del costo de la publicidad, lo cual se obtiene de descontar un 5% sobre el valor de venta del AGV, el cual se fija en US\$ 3000 por motivos que analizaremos en la subsección siguiente. En la Tabla 9-10 se puede observar el costo variable total por unidad producida. Los costos de envío no fueron contemplados ya que quedan a cargo del cliente.

| Concepto de gasto (anual)         | Valor en dólares (US\$) |
|-----------------------------------|-------------------------|
| <b>Costo por unidad (dólares)</b> | 1.079,04                |
| <b>Publicidad</b>                 | 150                     |
| <b>Total de gastos variables</b>  | 1.229,04                |

*Tabla 9-10 Gastos variables del proyecto*

### 9.3.3. Ingresos

Por el esquema con el que se planteó el plan de negocios de este proyecto, se cuenta con dos ingresos diferentes. Por un lado, se percibe el ingreso por cada unidad vendida que, como se mencionó previamente, su valor de venta se establece en US\$ 3000. Este valor resulta de un análisis de mercado que muestra valores de AGVs tanto nacionales como importados que pueden variar entre los US\$ 10.000 y US\$ 30.000. Sin embargo, es posible conseguir ciertos AGVs importados de China a través de páginas de internet de este origen que ofrecen soluciones de AGVs por precios cercanos a los US\$3000 pero no incluyen los costos de envío, los cuales pueden aumentar el valor hasta los US\$5.000. Es por esto que, con el objetivo de tener un plan conservador, se tomó el valor de US\$ 3000, que representa un valor competitivo para Argentina ya que consiste en un valor equivalente al más económico encontrado y, además, al ser un producto local, permite contar con un servicio de postventa lo cual ayudaría a la hora de atraer clientes a pesar de ser un emprendimiento nuevo.

Por otra parte, como se mencionó al hacer el análisis del plan de negocios, se cuenta con un sistema de suscripciones que se fijó en un valor de US\$ 500 anuales. Si bien a primera vista puede parecer un valor excesivo, no hay que olvidar que se trata de un valor anual, enfocado hacia empresas, y que los beneficios que se incluyen son: un servicio técnico personalizado, un AGV de reemplazo mientras la unidad se encuentra en reparación, actualizaciones de software y repuestos, configuración de la unidad

específicamente para el establecimiento del cliente tanto al momento de la compra como en futuras reconfiguraciones, entre otras necesidades específicas que puedan acordarse con cada cliente.

#### 9.3.4. Cuadro de resultados y rendimiento

A modo de conclusión, después de haber realizado todo el análisis de variables económicas del proyecto se pudo llevar a cabo el cuadro de resultados. La proyección del estudio se realizó a diez años dada la envergadura de este y se puede visualizar en la Tabla 9-11 y la Tabla 9-12. Los valores están expresados en dólares (US\$).

| Año                     | 1          | 2          | 3           | 4           | 5           |
|-------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Suscriptores</b>     | 40,00      | 80,00      | 120,00      | 160,00      | 200,00      |
| <b>Cant. vendida</b>    | 40,00      | 40,00      | 40,00       | 40,00       | 40,00       |
| <b>Ventas</b>           | 140.000,00 | 160.000,00 | 180.000,00  | 200.000,00  | 220.000,00  |
| <b>Costos fijos</b>     | -93.909,49 | -93.909,49 | -104.797,55 | -104.797,55 | -115.685,61 |
| <b>Costos variables</b> | -49.161,57 | -49.161,57 | -49.161,57  | -49.161,57  | -49.161,57  |
| <b>Utilidades BU</b>    | 0,00       | 0,00       | 0,00        | 0,00        | 705,36      |
| <b>EBITDA</b>           | -3.071,06  | 16.928,94  | 26.040,88   | 46.040,88   | 55.858,19   |
| <b>Amortización</b>     | 1.187,99   | 1.187,99   | 1.187,99    | 1.187,99    | 1.187,99    |
| <b>EBIT</b>             | -1.883,07  | 18.116,93  | 27.228,87   | 47.228,87   | 57.046,17   |
| <b>IG+IVA+IIBB</b>      | -11.501,39 | -16.552,20 | -20.538,67  | -29.288,67  | -33.583,74  |
| <b>Uneta</b>            | -13.384,46 | 1.564,73   | 6.690,20    | 17.940,20   | 23.462,43   |

Tabla 9-11 Cuadro de resultados (Años 1-5)

| Año                     | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Suscriptores</b>     | 240,00      | 280,00      | 320,00      | 360,00      | 400,00      |
| <b>Cant. vendida</b>    | 40,00       | 40,00       | 40,00       | 40,00       | 40,00       |
| <b>Ventas</b>           | 240.000,00  | 260.000,00  | 280.000,00  | 300.000,00  | 320.000,00  |
| <b>Costos fijos</b>     | -115.685,61 | -115.685,61 | -126.573,66 | -126.573,66 | -126.573,66 |
| <b>Costos variables</b> | -49.161,57  | -49.161,57  | -49.161,57  | -49.161,57  | -49.161,57  |
| <b>Utilidades BU</b>    | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 705,36      |
| <b>EBITDA</b>           | 75.152,83   | 95.152,83   | 104.264,77  | 124.264,77  | 144.970,13  |
| <b>Amortización</b>     | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| <b>EBIT</b>             | 75.152,83   | 95.152,83   | 104.264,77  | 124.264,77  | 144.970,13  |
| <b>IG+IVA+IIBB</b>      | -41.505,40  | -50.255,40  | -54.241,88  | -62.991,88  | -72.050,47  |
| <b>Uneta</b>            | 33.647,42   | 44.897,42   | 50.022,89   | 61.272,89   | 72.919,65   |

Tabla 9-12 Cuadro de resultados (Años 6-10)

En los cuadros de resultados se puede observar el aumento de suscriptores a medida que se venden más unidades año a año. El número de ventas anuales se estableció invariante con el paso del tiempo para brindar un panorama más conservador, ya que, en un contexto de mercado estándar, el número de unidades

ventas debería aumentar con el paso del tiempo. Respecto de las utilidades por la venta de bienes de uso se consideró un valor de reventa de un 20% del valor de compra, y un valor de libros de un 10%. Además, considerando un tiempo de vida útil contable de 5 años se calculó una amortización de los equipos de US\$ 1.188 durante los primeros 5 años.

Por último, en lo que a impuestos respecta, se consideraron el impuesto a las ganancias, el impuesto al valor agregado e ingresos brutos. El impuesto a las ganancias, por tratarse de una sociedad anónima simplificada, sobre la cual se desarrollará más adelante, tiene una carga impositiva fija del 25%. Por otra parte, el impuesto al valor agregado para productos electrónicos corresponde a un valor del 10,5% y, finalmente, ingresos brutos representa un impuesto equivalente al 3,5%.

Habiendo analizado el cuadro de resultados es posible hacer un estudio del flujo de fondos del proyecto. Este se puede ver en la Tabla 9-13 y la Tabla 9-14.

| Año                | 0          | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |
|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Inv BU</b>      | -7.409,92  | 0           | 0           | 0           | 0           | 1.319,98    |
| <b>Inv KT</b>      | -68.365,55 | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| <b>Ventas</b>      | 0          | 140.000     | 160.000     | 180.000     | 200.000     | 220.000     |
| <b>Costos</b>      | 0          | -143.071,06 | -143.071,06 | -153.959,12 | -153.959,12 | -164.847,17 |
| <b>IG+IVA+IIBB</b> | 0          | -11.501,39  | -16.030,62  | -18.308,61  | -23.308,61  | -25.762,93  |
| <b>FF</b>          | -75.775,47 | -14.572,45  | 898,32      | 7.732,28    | 22.732,28   | 30.709,88   |
| <b>FF ACC</b>      | -75.775,47 | -90.347,92  | -89.449,60  | -81.717,32  | -58.985,05  | -28.275,17  |

Tabla 9-13 Flujo de fondos (Años 0-5)

| Año                | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Inv BU</b>      | 0           | 0           | 0           | 0           | 1.319,98    |
| <b>Inv KT</b>      | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| <b>Ventas</b>      | 240.000     | 260.000     | 280.000     | 300.000     | 320.000     |
| <b>Costos</b>      | -164.847,17 | -164.847,17 | -175.735,23 | -175.735,23 | -175.735,23 |
| <b>IG+IVA+IIBB</b> | -30.289,60  | -35.289,60  | -37.567,58  | -42.567,58  | -47.743,92  |
| <b>FF</b>          | 44.863,23   | 59.863,23   | 66.697,19   | 81.697,19   | 97.840,83   |
| <b>FF ACC</b>      | 16.588,06   | 76.451,29   | 143.148,48  | 224.845,67  | 322.686,50  |

Tabla 9-14 Flujo de fondos (Año 6-10)

Analizando el flujo de fondos se visualiza el ingreso de dinero en el período de estudio. De analizar el flujo de fondos se observa un recupero de la inversión de aproximadamente 5 años y 7 meses, A su vez, de este análisis también podemos obtener el VAN y la TIR. Se seleccionó una tasa de descuento del 1,75% para calcular el VAN, la cual se corresponde con la tasa nominal anual provista por el banco nación para plazos fijos en dólares, obteniendo así un VAN de US\$ 271.121 y una tasa interna de retorno de 24%.

Llegada esta instancia, se visualiza la viabilidad del proyecto y la rentabilidad de este en el hecho de que el VAN resulta mayor a cero.

## 9.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil (regulaciones y licencias)

### 9.4.1. Sociedad Anónima Simplificada

Por el esquema de proyecto que se planteó, de entre los tipos de sociedades existentes que se pueden formar, la más conveniente es la Sociedad Anónima Simplificada (SAS) [9], ya que está enfocada en nuevos emprendimientos y brinda una gran variedad de beneficios los cuales se detallan a continuación:

1. Simple. Es más sencilla de constituir y más económica respecto de las sociedades tradicionales, las Sociedades Anónimas (SA) y las Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL), que son las formas legales más habituales hasta ahora en la Argentina.
2. No se necesitan socios. A diferencia de las SRL o las SA, que requieren por lo menos dos socios para constituirse, la SAS puede ser unipersonal, es decir, estar en manos de un único emprendedor.
3. No tiene límite de socios. Tampoco tiene un número máximo de integrantes, como sí ocurre en las SRL, donde se acepta hasta 50 asociados.
4. Se constituye en un tiempo breve. Si se utiliza el modelo estándar previamente aprobado, la inscripción puede realizarse hasta en 24 horas, de acuerdo con lo dispuesto en el art. 38 de la mencionada ley 27.349 (Ley Pymes).
5. Digitalización. Se promueve la digitalización de la inscripción societaria, así como la notificación por la misma vía, lo que acelera significativamente todos los plazos de registración y modificaciones estatutarias. Al realizar la inscripción, se obtiene la Clave Única de Identificación Tributaria (CUIT) online.
6. Fácil incrementar el capital. Está autorizada la integración de un aumento de capital inferior al 50% del mismo sin necesidad de publicar edictos ni registración. Se faculta a realizar aportes irrevocables por 24 meses.
7. Clases de acciones. Pueden constituirse por instrumento público o privado y su capital puede dividirse en acciones, que a su vez admiten distintas clases (ordinarias, preferidas o escriturales), lo que no ocurre en las SRL.
8. Facturas. La AFIP otorga factura tipo A automáticamente, al momento de la constitución, no ocurriendo lo mismo con otros tipos de sociedades.
9. Administración unipersonal. La administración puede ser unipersonal con la designación de un suplente, salvo que se haya propuesto un síndico. Su duración puede ser indeterminada y la fijará el estatuto social.
10. Capital inicial reducido. El capital mínimo que requiere para su constitución es menor que el de otros tipos de sociedades. El mismo es equivalente a dos salarios mínimos, vitales y móviles, a diferencia de la sociedad anónima (SA) donde se exige la suscripción mínima de \$ 100.000.
11. Separación del capital personal. Reduce los riesgos, por ejemplo, frente a una inscripción como monotributista, ya que los accionistas de una SAS limitan su responsabilidad a la integración de las acciones que suscriban o adquieran.

12. Objeto social amplio. El objeto social podrá ser plural y deberá enunciar en forma clara y precisa las actividades principales que constituyen el mismo
13. Control. No necesita sindicatura, a diferencia de la sociedad anónima unipersonal, que sí la requiere. Tampoco estarán bajo la fiscalización de la Inspección General de Justicia (IGJ), por lo que no deben presentar sus estados contables a este organismo, como sí deben hacerlo las SA.
14. Impuestos. Respecto al impuesto a las ganancias la AFIP estableció que "Para los ejercicios fiscales que se inicien desde el 01/01/2020 resultará aplicable la alícuota del 25 por ciento." Con relación al IVA, la AFIP aclara que no se contempla un tratamiento especial por este tipo societario, se aplica la regla general.

#### 9.4.2. Resolución 171/16 - Seguridad Eléctrica

En la Argentina está vigente la resolución 171/16 [10], la cual es de cumplimiento obligatorio y exige que todos los productos eléctricos y electrónicos que se comercializan dentro del territorio nacional cuenten con un certificado de seguridad del cumplimiento de los requisitos de seguridad esenciales emitido por un organismo de certificación de productos. La resolución aplica para los productos eléctricos y electrónicos que se comercializan dentro del territorio nacional, los mismos deben contar con un certificado de cumplimiento de los requisitos de seguridad esenciales emitido por un organismo acreditado por el OAA y reconocido por la Dirección Nacional de Comercio Interior. Esta resolución establece que, si los productos cumplen con las normas IRAM o IEC aplicables, los requisitos esenciales de seguridad se dan por satisfechos.

Para demostrar dicho cumplimiento podrán utilizar uno de los siguientes sistemas de certificación: Sistema N° 4 (de Tipo); Sistema N° 5 (de Marca) o Sistema N° 7 (de Lote). De todos estos, el sistema que contempla a aquellos productos que más se asemejan a un AGV es el Sistema N°5 (Marca de conformidad).

Sin embargo, el inciso g del artículo 12 de la resolución indica que:

**" ARTÍCULO 12. - No están incluidos en el alcance de la presente resolución los siguientes productos:**

*g) Todos los materiales y aparatos eléctricos y electrónicos diseñados para utilizarse con una tensión inferior a los CINCUENTA VOLT (50 V), ya sea a través de una fuente de alimentación externa o bien que alternativamente funcionen con una fuente autónoma, a excepción de:*

*I) Las lámparas dicróicas o bi-pin y sus portalámparas,*

*II) las lámparas de leds y los módulos montados con led,*

*III) las herramientas portátiles manuales,*

*IV) los electrificadores de cercas,*

*V) los electro estimuladores musculares que complementan la actividad física, y*

*VI) las luminarias y sistemas de alimentación para luminarias, que estarán obligados a dar cumplimiento a la certificación establecida en el Artículo 1° de la presente medida; "*

De esta forma, dado que la unidad trabajará con tensiones menores a los 50V, la misma queda comprendida dentro de los productos que no son abarcados por la resolución y no necesita certificación alguna.

#### 9.4.3. Seguridad e higiene en el trabajo (Decreto 911/96)

Existe un decreto concerniente a la seguridad e higiene en el trabajo que complementa a lo establecido por la Ley de Seguridad e Higiene en el Trabajo Nº 19.587. Este decreto es el 911/96 y hay una serie de artículos que establecen ciertas normas que atañen a maquinaria industrial y, si bien no se especifican vehículos de guiado autónomo, los mismos categorizan como maquinaria industrial. A continuación, se citan los artículos destacados que se vinculan con el proyecto en cuestión y que deben ser cumplidos:

##### En el apartado de Señalización en la construcción:

*“ARTICULO 67. — Todas las herramientas, equipos y maquinarias deberán contar con señalamiento adecuado a los riesgos que genere su utilización, para prevenir la ocurrencia de accidentes.*

*ARTICULO 72. — Las partes de máquinas, equipos y otros elementos de obra, así como los edificios pertenecientes a la obra en forma permanente o transitoria, cuyos colores no hayan sido establecidos, se pintarán de cualquier color que sea suficientemente contrastante con los de seguridad y no provoque confusiones.*

*Las partes móviles de máquinas y equipos de obra serán señalizadas de manera tal que se advierta fácilmente cuál es la parte en movimiento y cuál la que permanece en reposo.”*

##### En el apartado de Ruidos y Vibraciones:

*“ARTICULO 132. — Todas las máquinas, equipos e instalaciones nuevas deberán tener incorporados los dispositivos que garanticen una adecuada atenuación de los ruidos que produzcan, siendo ésta una responsabilidad del fabricante, importador o vendedor. En aquellos casos que no pudiera lograrse un adecuado control de estos, se indicarán los niveles que produce el equipo en condiciones normales. Se indicará entre las características de venta de estos los niveles sonoros que genera el equipo en las distintas condiciones de uso.*

*A partir del 1º de enero de 1998 no se podrán comercializar máquinas o equipos que no cumplan lo estipulado en el presente artículo.”*

##### En el apartado de Herramientas Eléctricas:

*“ARTICULO 208 — Las herramientas eléctricas, cables de alimentación y demás accesorios deben contar con protección mecánica y condiciones dieléctricas que garanticen la seguridad de los trabajadores de acuerdo con lo establecido en el capítulo de Electricidad. Deben contar además con dispositivos que corten la alimentación en forma automática, ante el cese de la acción del operador.”*

##### En el apartado de Vehículos y Maquinaria Automotriz:

*“ARTICULO 208 — Las herramientas eléctricas, cables de alimentación y demás accesorios deben contar con protección mecánica y condiciones dieléctricas que garanticen la seguridad de los trabajadores de acuerdo con lo establecido en el capítulo de Electricidad. Deben contar además con dispositivos que corten la alimentación en forma automática, ante el cese de la acción del operador.*

*ARTICULO 246 — El personal afectado a operaciones con maquinarias y vehículos automotores deberá ser adecuadamente capacitado y adiestrado con relación a las tareas específicas a que sea destinado y a los riegos emergentes de las mismas.*

*ARTICULO 247 — Estas maquinarias y vehículos automotores deberán estar provistos de mecanismos y dispositivos de seguridad necesarios para:*

*b) evitar la caída de personas y de los materiales fuera de los citados receptáculos y vehículos o por los huecos existentes en la caja.*

*c) evitar la puesta en marcha fortuita y las velocidades excesivas peligrosas.*

*ARTICULO 248 — Previo a su uso deberá verificarse que los vehículos y maquinaria automotriz y todos sus componentes cumplan con las normas de seguridad en un todo de acuerdo con el presente capítulo.*

*Deberán mantenerse en perfecto estado de utilización:*

*a) el sistema electromecánico, sistema de frenos y dirección, luces frontales, traseras y bocinas;*

*b) los dispositivos de seguridad tales como: señales de dirección, limpiaparabrisas, descongeladores y desempañantes de parabrisas y de luneta trasera, extinguidores de incendio, sistema de alarma para neumáticos, espejos retrovisores, luces de marcha atrás, señal de marcha atrás audible para camiones y vehículos que la posean, superficies antideslizantes en paragolpes, pisos y peldaños, cinturón de seguridad, marcas reflectantes, etc.*

*ARTICULO 249 — Deberán llevar un rótulo visible con indicación de carga máxima admisible que soportan, según lo normado en el Capítulo de Señalización.*

*En ningún caso transportarán personas, a menos que estén adaptados para tal fin.*

*ARTICULO 250 — Todos estos vehículos estarán provistos de frenos que puedan inmovilizarlos aun cuando se hallen cargados al máximo de su capacidad, en cualquier condición de trabajo y en máxima pendiente admitida. Dichos frenos serán bloqueados cuando el vehículo se encuentre detenido. Además, el vehículo deberá estar provisto de calzas para sus ruedas, las que deberán utilizarse cuando sea necesario y siempre y cuando el vehículo se encuentre detenido en pendiente.*

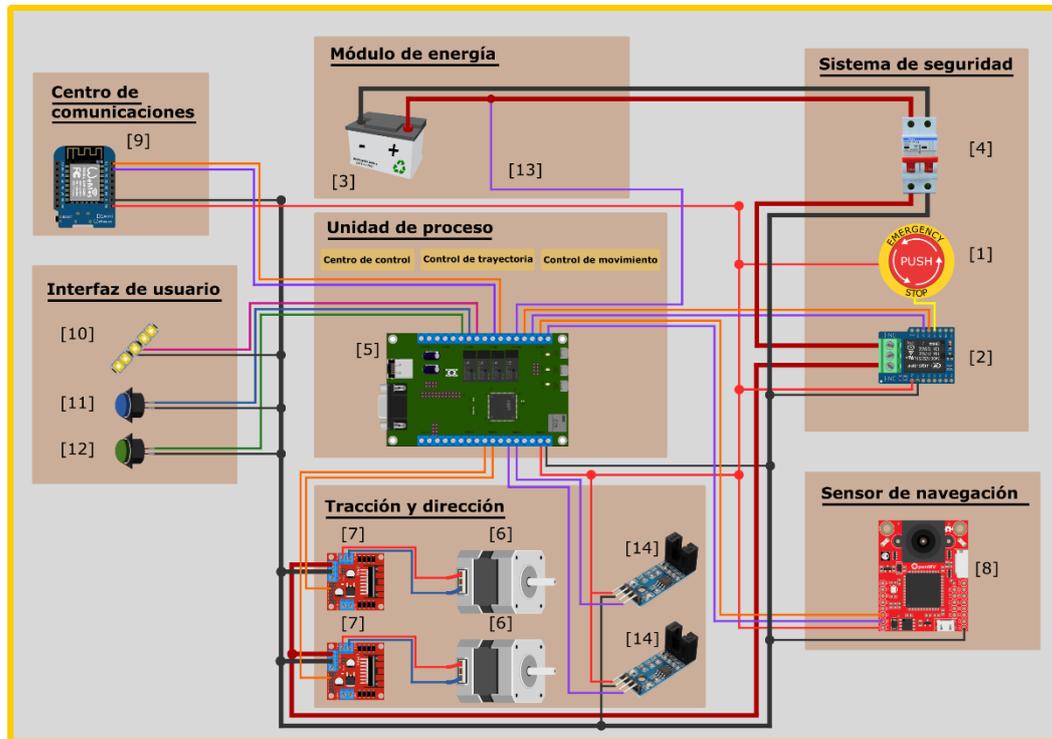
*ARTICULO 255 — El mecanismo de enganche de los vehículos de tracción evitará que el trabajador tenga que colocarse entre el vehículo que se engancha y el contiguo, si uno de ellos está en movimiento. Impedirá que los vehículos que se enganchen puedan chocar entre sí, tendrán una resistencia tal que permita remolcar la carga más pesada en las condiciones más desfavorables y estarán provistos de mecanismos de enclavamiento.*

*Los pasadores estarán diseñados de forma que no puedan salirse accidentalmente de su sitio. Se utilizarán, en caso de ser necesario, cadenas de enganche.”*

## 10. Ingeniería de detalle

### 10.1. Hardware

#### 10.1.1. Diagrama de bloques (hardware).



- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| [1] Golpe de puño             | [09] ESP-8266                |
| [2] Circuito de seguridad     | [10] Señalización LED Strip  |
| [3] Baterías                  | [11] Pulsador multifunción   |
| [4] Termica de seguridad      | [12] Pulsador OK             |
| [5] CIAA                      | [13] Sensor de tensión (ADC) |
| [6] Motor                     | [14] Encoder (LM393)         |
| [7] Controlador de motor      |                              |
| [8] Sensor de camino (OpenMv) |                              |

Figura 10-1 Diagrama modular de Hardware

#### 10.1.2. Descripción detallada de cada bloque

En la Figura 10-1 se puede observar el diagrama modular de *hardware* del vehículo. Cada uno de los módulos está integrado por diferentes componentes de *hardware*. Juntos resuelven el funcionamiento del vehículo implementando cada uno de los bloques vistos en la sección 9.1.1. A continuación, se analiza cada módulo en detalle y se definen los parámetros de selección para los componentes de *hardware*.

Cabe destacar que hay tres parámetros de selección que son comunes para todos los componentes. En primer lugar, se debe considerar el consumo de energía. Dada la naturaleza del sistema, es crítico que los componentes consuman la menor cantidad de energía posible, de forma que el tiempo de operación del vehículo se maximice. Por otro parte, la vida útil de los componentes también es un factor importante para tener en cuenta ya que afectará directamente a la confiabilidad del sistema. Por último, el costo de los

componentes también es un factor relevante dado que la propuesta busca minimizar costos y la selección de los componentes es un punto crucial para lograr esto. Estas tres consideraciones no se enumeran en la descripción de cada módulo, pero se consideran implícitas en el análisis.

#### *Centro de comunicaciones*

Este módulo de hardware resuelve el bloque de centro de comunicaciones. Implementa la conexión inalámbrica del AGV y se conecta con el centro de control del vehículo para establecer el canal de comunicación entre el centro de mando y el AGV. Los parámetros de selección para hallar la solución óptima son:

- Facilidad de puesta en marcha (Librerías para simplificar la codificación de las comunicaciones).
- Protocolos de comunicación compatibles con el centro de control.
- Flexibilidad de implementación para el desarrollo de un protocolo de comunicación entre el centro de mandos y cada AGV.
- Alcance de la señal de comunicación.

La velocidad de transmisión no es un factor determinante debido a que los datos a transmitir al centro de mando son pocos.

#### *Unidad de Proceso*

Este módulo comprende la principal unidad de procesamiento del vehículo. Consiste en un microcontrolador, con los periféricos necesarios para poder integrar todos los módulos del sistema. En esta unidad se realiza el control del AGV, el procesamiento de las comunicaciones, el manejo de la trayectoria y el control de movimiento. Si nos referimos a la Sección 9.1.1, se explica en detalle el alcance que tiene cada uno de estos módulos. Por otra parte, en la Sección 10.2.1 se explican las funciones de software que ejecutan. Teniendo en cuenta estos dos aspectos se obtiene una serie de necesidades que debe satisfacer esta unidad de procesamiento:

- Amplio poder de procesamiento.
- Protocolos de comunicación.
- Entradas y salidas digitales.
- Bajo consumo.
- Robustez.
- Memoria suficiente.
- Capacidad de manejar interrupciones.
- Facilidad de puesta en marcha (se debe poder programar con facilidad, de forma que el sistema pueda ser actualizado con rapidez).

### *Sensor de navegación*

El sensor de navegación es el encargado de proporcionar la información para que la trayectoria que recorre el vehículo sea la correcta. Los bloques que este componente busca resolver son tanto el sensor de camino, como algunas funcionalidades del módulo de procesamiento de camino. El sensor debe ser capaz de conectarse con la unidad de proceso.

Es importante tener en cuenta la confiabilidad del sensor. Cabe destacar en este punto que el diseño del vehículo está hecho de forma tal que los módulos de control de trayectoria y control de movimiento sean independientes de la tecnología que se utilice. La calidad y flexibilidad que debe tener este bloque es crítica, ya que definirá las limitaciones y la confiabilidad del producto. Luego, los parámetros de selección son:

- Capacidades de conexión al sistema.
- Robustez y confiabilidad.
- Complejidad de implementación.
- Flexibilidad de funcionalidades.

### *Tracción y dirección*

Este módulo cumple con la función de traccionar, direccionar y frenar el vehículo. La cantidad de motores y la dimensión de estos quedan determinados por las características constructivas del vehículo. Luego, siguiendo la topología diferencial que se explicó en la sección 9.1.2, este bloque consiste en dos motores eléctricos, cada uno con su controlador asociado y con la rueda acoplada al eje.

Los controladores le permiten al microcontrolador entregar energía a los motores según lo requiera, para lograr que el vehículo se mueva. Los mismos funcionan como interfaz de una señal lógica de PWM de baja potencia a una señal PWM de alta potencia, que se utiliza para energizar las bobinas de los motores y generar movimiento.

Para la selección de los motores se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros.

- Potencia necesaria
- Tamaño y peso
- Tensión de alimentación
- Características constructivas y facilidad de integración.

El control de los motores también implica un componente indispensable, que es el sensor para medir su velocidad. Para esto, se utilizan sensores que miden la rotación del rotor y envían una señal digital cada vez que el rotor gira una cantidad determinada de grados. Este tipo de sensor es comúnmente llamado *encoder*. La precisión de la medición queda determinada por la cantidad de pulsos por vuelta que envía el *encoder* al microcontrolador. Los parámetros de selección más relevantes para la selección de este sensor son:

- Precisión
- Calidad de la señal
- Características constructivas y facilidad de integración

Naturalmente, a medida que el *encoder* mejora su precisión y la calidad de la señal que emite, el precio del componente aumenta de forma abrupta. Teniendo esto en cuenta, la precisión debe ser suficiente para alcanzar las especificaciones de error en la velocidad del AGV.

Por último, cabe aclarar que el último punto enumerado tanto en los parámetros del motor como en el *encoder* corresponde a la complejidad que representa integrar las piezas del módulo. Teniendo en cuenta que los motores son la mayor fuente de ruido del sistema y que la medición de los *encoders* es crítica, es importante tener en cuenta la forma en la que se pueden integrar estos módulos. Esto es válido tanto desde el punto de vista constructivo como eléctrico. En la sección 10.1.3 se analizan en mayor detalle las consideraciones que se tuvieron en cuenta para resolver esto.

#### *Sistema de Seguridad*

Este módulo resuelve el bloque de seguridad, el cual debe reducir la posibilidad de accidentes mientras el vehículo esté operando. Para lograr esto, se compone de un botón de emergencia que detiene la operación del vehículo, un interruptor termomagnético que asegura que la corriente consumida no supere un determinado nivel y una placa de seguridad que conecta los sensores con los controladores de los motores.

El módulo también requiere de un componente que sea capaz de procesar los eventos que puedan ocurrir. En caso de una emergencia, este módulo será capaz de activar un protocolo de emergencia que detenga la operación del vehículo, tanto desde el punto de vista lógico como físico y reinicie el sistema de ser necesario. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para este módulo fueron los siguientes:

- Robustez.
- Complejidad de implementación.
- Independencia de proceso.

#### *Módulo de energía*

El módulo está compuesto por la batería que alimenta el vehículo y un componente que sea capaz de medir el nivel de carga. Los factores más relevantes se mencionaron en las secciones anteriores. El componente en cuestión puede ser implementado por un periférico del microcontrolador que constituye la unidad de proceso. Luego, los principales parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección de la batería fueron:

- Disponibilidad.
- Capacidad.
- Peso.

### *Tablero de operaciones*

El tablero de operaciones actúa de interfaz directa con el usuario. Consiste en una serie de señalizaciones visuales y auditivas que permite al operador identificar el estado en el que está el vehículo y realizar mínimas configuraciones de forma manual, en el caso que sea necesario. En particular, se conforma por dos tiras de LEDs y dos pulsadores de operación. Estos componentes sirven de alerta para el operador y deben ser accesibles, de forma que la interacción con los mismos sea cómoda e intuitiva. Entonces, los parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección de estos componentes fueron:

- Calidad de manufactura.
- Accesibilidad para el operador.

#### 10.1.3. Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales de cada bloque

### *Unidad de Proceso*

Para la implementación de la computadora abordo se decidió utilizar la CIAA (Computadora Industrial Abierta Argentina) modelo NXP. Esta es una computadora desarrollada en Argentina, diseñada para operar en procesos industriales. Posee un microcontrolador LPC4337 que incluye los periféricos necesarios para implementar los módulos descritos anteriormente. Al ser de industria nacional, el costo es accesible y hay gran disponibilidad. Cabe destacar que el proyecto es abierto, por lo que el esquemático del producto también es accesible de forma gratuita y puede ser modificado en base a las necesidades.

A continuación, se presenta la lista de especificaciones del componente y una imagen de este en la Figura 10-2.

#### CIAA-NXP:

- ARM Cortex M4 @ 204 MHz
- Coprocesador ARM Cortex M0
- Entradas digitales opto-acopladas
- Salidas a relé y salidas colector abierto
- Interfaces de comunicación USB, CAN, I2C, SPI, RS232 y RS485
- *Hardware* y *firmware* de código abierto
- Compatible con Free-RTOS
- Preparada para uso industrial
- *Debugger* integrado
- Industria Argentina
- Costo: 360 US\$

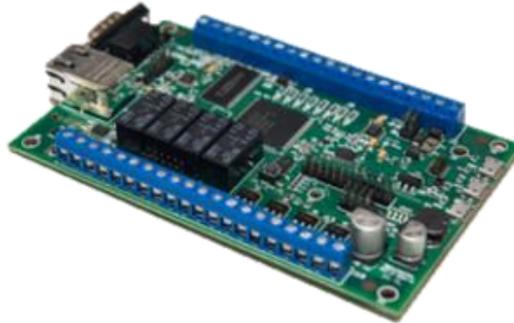


Figura 10-2 CIAA-NXP

Como se puede observar, las características de este controlador satisfacen las necesidades de los bloques que se implementan en el producto. Las entradas opto-acopladas aseguran que el microcontrolador no sufra daños en el caso de que haya sobre tensiones o que ocurra algún accidente. Las salidas a relé sirven para comandar los componentes que requieran corrientes altas y evitan que el microcontrolador sea exigido. Por último, si nos referimos a la documentación de la placa, explica que *“...está concebida desde su origen como una plataforma industrial por lo cual dispone de mecanismos de protección eléctrica contra fallas o sobrecargas, y, de esta forma, brinda una base sólida para diseñar sistemas robustos y confiables de considerar cuestiones de disponibilidad, confiabilidad, verificación, validación y seguridad intrínseca.*

*Esto le brinda la posibilidad de certificar normas internacionales como las IEC 61131 y la IEC 61508, contemplando criterios de robustez ante interferencia electromagnética, sobrecarga de las salidas, vibraciones mecánicas, estrés térmico, perturbaciones en la tensión de alimentación y variabilidad de los componentes, entre otras. (...)*

*Esto permite que cualquier usuario de la CIAA pueda aprovechar para su aplicación un entorno de desarrollo seguro y de alta calidad que, además, ha sido validado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).” [11]*

#### *Centro de comunicaciones*

Para este módulo, se utilizó el WeMos D1 mini ESP8266. Se enlistan algunas de las características del módulo:

- Costo: 8.16 US\$
- Librerías incorporadas para manejo de paquetes de internet, protocolos MQTT y comunicación vía UART
- 9 GPIOs
- Memoria Flash integrada para mantener el programa
- Posibilidad de acoplar una antena de mayor alcance.
- Al utilizar el microprocesador ESP-8266 internamente, facilita el desarrollo de una placa específica, ya que el código es trasladable.



Figura 10-3 Módulo ESP para comunicaciones

Para la comunicación con el centro de control, es necesario un protocolo robusto que sea inmune a ruido que pueda ingresar en el sistema. Esto se debe a que es conveniente ubicar el módulo de - en la superficie del vehículo para conseguir mejor señal de red, por lo que los cables deben recorrer distancias largas que atraviesan todo el vehículo. Por estas razones, se utiliza el protocolo RS-232 para comunicarse con el centro de control.



Figura 10-4 Conversor TTL a RS-232

El protocolo RS-232 utiliza tensiones bipolares de  $\pm 6$  V, junto con un conector específico. Debido a esto, tiene una mayor tolerancia a interferencia electromagnética que un canal típico de UART de 3.3 V. En este caso, se utilizó un conversor TTL a RS-232, solo utilizando las líneas de transmisión de datos. No se utilizaron las señales de control de flujo ya que es una conexión entre solo 2 puntos y, con un protocolo de mensajes UART asincrónico, es más simple de configurar los drivers tanto de la CIAA como del ESP.

La CIAA cuenta con un conector hembra DB-9 de RS-232, junto con el circuito necesario para adaptarlo a su controlador de UART.

#### *Sensor de navegación*

Para la navegación se decidió utilizar la cámara OpenMV H7. La misma es pequeña, de bajo consumo y cuenta con un microcontrolador integrado para poder realizar fácilmente el procesamiento de las imágenes que son capturadas. La misma resulta confiable y permite, por ser un sensor de tipo óptico, interpretar el camino futuro en caso en el que la línea se encuentre interrumpida o no se visualice de forma ideal.



Figura 10-5 Conectores macho y hembra DB-9 RS-232

A continuación, está la figura de la cámara junto con algunos detalles técnicos de la misma.

- LED RGB y dos LED IR de 850 nm de alta potencia.
- El procesador STM32H743VI ARM Cortex M7 funciona a 400MHz con 1MB de RAM y 2MB de flash.
- Todos los pines de I/O dan salida a 3,3 V y son tolerantes a 5V.
- OpenMV Cam H7 viene con un sensor de imagen OV7725, capaz de tomar imágenes en escala de grises de 640x480 de 8 bits o imágenes RGB565 de 640x480 de 16 bits a 60 FPS.
- El sensor de imagen viene con una lente de 2.8 mm en una montura de lente estándar M12.



Figura 10-6 OpenMV H7

Una de las ventajas de este producto es la posibilidad de programar el procesador en el lenguaje MicroPython. Gracias a esto, es posible aprovechar las facilidades de un lenguaje de alto nivel para programar los algoritmos de identificación de imágenes.

Al igual que con el módulo de comunicaciones, es importante la comunicación entre el sensor de navegación y el centro de control. Debido a que la información que provee OpenMV es crítica para la seguridad y el funcionamiento del AGV, es importante asegurar la integridad de los datos para evitar errores en la toma de decisiones y seguimiento del camino.

Por esta razón, se utiliza la capa física RS-485 para comunicar la CIAA con el OpenMV. Este tipo de comunicación se utiliza ampliamente en la industria, provee robustez debida a su codificación diferencial y llega a velocidades altas de comunicación. Sin embargo, esto último no es de suma importancia ya que los algoritmos de identificación de imágenes son lentos y la tasa de bits de información que se deben comunicar no es elevada.

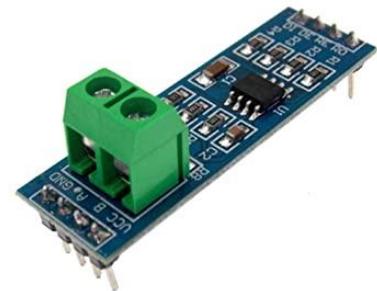


Figura 10-7 Conversor TTL a RS-485

Para usar esta capa física, se decidió utilizar un conversor TTL a RS-485 para la conexión con la cámara. La CIAA cuenta con entradas RS-485 y el circuito correspondiente para adaptarlo a su controlador de UART. Cabe destacar que esta interfaz física es *half-duplex*, lo que significa que sólo se puede transmitir datos desde un punto de la red a la vez y esto debe ser considerado en el protocolo de comunicación que se utilice.

### Sistema de seguridad

El sistema de seguridad está compuesto por una llave termomagnética, un golpe de puño que al ser activado actúa como parada de emergencia y una placa de seguridad que conecta los diferentes componentes de

seguridad con el sistema de frenado del vehículo. A continuación, se analiza cada uno de estos componentes en detalle.

#### Placa de seguridad

La placa de seguridad consiste en un circuito puente que conecta el golpe de puño, potencialmente cualquier sensor de seguridad, como por ejemplo un paragolpes, y la unidad de proceso con el controlador de los motores. De esta forma se puede cortar la alimentación de estos, provocando el frenado del vehículo en caso de que ocurra alguna emergencia. La placa fue diseñada específicamente para este proyecto, el circuito de esta no es complejo y no requiere ninguna consideración constructiva particular. En la sección 11.2 se encuentra el análisis en detalle del diseño y en la sección 15.1 se encuentra el esquemático del mismo.

#### Interruptor termomagnético

El interruptor termomagnético se utiliza principalmente para desconectar automáticamente la batería del sistema en caso de un cortocircuito. Dado que la batería seleccionada es capaz de entregar más de 400 A, un cortocircuito en el sistema sería catastrófico e inseguro, tanto para el vehículo como para la batería. Teniendo en cuenta los cálculos realizados en la selección de los motores, estos pueden llegar a consumir 2,85 A. Luego, una llave con curva de disparo tipo C, que se activa ante un pico de corriente de 6 A es suficiente. Este componente es capaz de activarse ante cualquier cortocircuito, antes de que este provoque un daño en la batería. Vale la pena mencionar que, como capa adicional de seguridad para el sobreconsumo del vehículo, los controladores de los motores limitan la potencia consumida por los mismos. De esta manera, los motores no están expuestos a condiciones extremas de operación. En la Figura 10-8 se puede observar la imagen del modelo de llave seleccionada, esta es una llave térmica unipolar Schneider de 6 A, modelo Easy 9.



Figura 10-8 Llave termomagnética

Las especificaciones de la llave son las siguientes:

- Polos: 1P
- corriente nominal: 6 A
- Tipo de unidad de control: Térmico-magnético
- Código de curva de disparo ins: C
- Poder de corte: 4500 A Icn conforme a IEC 60898-1

#### Parada de emergencia

Para realizar una parada de emergencia es necesario un pulsador confiable y seguro que garantice el frenado del vehículo en caso de ser necesario. Por ello se seleccionó un pulsador de parada de emergencia con retención de la marca Schneider Electric con configuración normal cerrado. Las especificaciones técnicas del pulsador son las siguientes:

- Resistencia mecánica: 100000 ciclos
- Resistencia eléctrica: 1500000 ciclos
- Protección contra corto circuito: 10 A fusible gL conforme a IEC 60269-1
- Tensión asignada de aislamiento: 600 V conforme a IEC 60947-1
- Intensidad asignada de empleo: 3 A 240 V, AC-15, A600 / 0,27 A a 250 V, DC-13, Q600



Figura 10-9 Pulsador de emergencia

Cabe aclarar que el pulsador no interrumpe la alimentación de forma directa. En la sección 15.1 se encuentra el esquemático que muestra la forma en la que se conecta el pulsador.

#### Tablero de operaciones

El tablero de operaciones cuenta con diversos elementos para poder interactuar con la persona que controla la unidad o que simplemente se encuentra con ella.

Por un lado, la unidad debe poder recibir órdenes a través del tablero, por lo cual se colocan dos pulsadores, uno de color verde y otro de color azul, para poder diferenciar funciones. Estos botones además cuentan con luz, permitiendo así poder dar información al usuario sobre el estado en el que se encuentra el dispositivo como, por ejemplo, indicar un estado de pausa, de inicio de misión, entre otros.

Finalmente se incorporan luces de señalización con gran poder lumínico que indican posición, giro izquierdo, giro derecho, emergencia y balizas, tanto en la parte delantera como trasera del vehículo.



Figura 10-10 Pulsador de accionamiento



Figura 10-11 Luces de señalización

### Motores

Para el cálculo de la potencia de los motores se deben considerar diversos factores incluidos: el peso total del vehículo, el tipo de terreno sobre el cual se debe desplazar, la inclinación que deberá superar en su recorrido, entre otras. Por lo tanto, el cálculo requiere identificar previamente las características de la aplicación que son relevantes, para obtener un cálculo apropiado y poder seleccionar la potencia de los motores. Es importante notar que el costo de los motores con relación a la potencia no sigue una relación lineal, sino que se puede ver rangos de costos definidos para distintos rangos de potencia, con importantes diferencias en el precio entre cada categoría. Esto implica que un cálculo con demasiado margen de seguridad, que por lo tanto requiere un motor de mayor potencia, puede incurrir en un motor sustancialmente más caro del realmente necesario si justo se da un quiebre en el rango de costos. Por otro lado, si la potencia se elige demasiado ajustada, es posible que el motor no cumpla con las exigencias de la aplicación debido a incertezas a la hora de realizar el cálculo.

A continuación, se detalla una tabla donde se pueden encontrar los factores a considerar y el razonamiento que se tuvo en cuenta a la hora de realizar el cálculo:

| Factor                      | Criterio / Comentario  | Valor tomado |
|-----------------------------|--|--------------|
| Peso del vehículo           | Para estimar el peso del vehículo, se llevó a cabo el diseño mecánico del mismo en SolidWorks. Esta herramienta nos permite obtener las propiedades físicas del modelo, habiendo definido los materiales a utilizar. El modelo diseñado se puede ver en la sección 11.3, y toma en cuenta el peso de toda la estructura mecánica del vehículo: caños de la estructura, bancadas del eje, rodamientos, ruedas, batería y motores (estimado ya que aún no se eligieron). | 43 kg        |
| Carga a transportar         | La carga que deberá llevar se le suma al peso del vehículo a la hora de realizar el cálculo. El valor se obtiene de las especificaciones.  | 10 kg        |
| Diámetro de las ruedas      | Las ruedas del vehículo fueron prestadas al equipo por parte de la empresa donde uno de los integrantes trabaja, por lo que el diámetro de las ruedas es fijo.   | 250 mm       |
| Tipo de terreno             | El tipo de terreno afecta en gran medida la potencia que deben tener los motores. No es lo mismo rodar sobre pasto que sobre asfalto. Para cada tipo de terreno, se puede utilizar un coeficiente de fricción de rodamiento que depende del material de la rueda y del terreno.<br><br>En este caso, se consideró ruedas de caucho sobre piso de concreto, algo esperable del entorno en una planta.   | 0.015        |
| Inclinación máxima del piso | Los motores deben ser capaz de trasladar el vehículo y vencer la fuerza gravitatoria al estar sobre un plano inclinado. El valor de inclinación máxima viene dado de las especificaciones.   | 1.72°        |
| Velocidad máxima            | Los motores deben ser capaces de alcanzar la velocidad máxima deseada con la carga del vehículo. El valor viene dado de las especificaciones.  | 0.45 m/s     |
| Tiempo de Aceleración       | Para alcanzar la velocidad máxima en menor tiempo se requieren motores de mayor potencia. El valor viene dado de las especificaciones.   | 1.8 s        |

|                     |   |     |
|---------------------|---|-----|
| Factor de seguridad | El factor de seguridad toma en cuenta un cierto nivel de incertidumbre que existe en la realidad. | 1.5 |
|---------------------|---|-----|

Tabla 10-1 Factores para el cálculo de motores.

Los resultados de los cálculos que se hicieron para realizar el dimensionamiento de los motores son los siguientes:

- Velocidad nominal del eje de salida:  $n_{nominal} = 34,39 \text{ RPM} = 3,6 \text{ rad/seg}$
- Torque de carga nominal:  $T_L = 4,48 \text{ N} \cdot \text{m}$
- Torque de aceleración:  $T_A = 1,84 \text{ N} \cdot \text{m}$
- Torque combinado total:  $T_{total} = (T_L + T_A) \cdot 1,5 = 9,486 \text{ N} \cdot \text{m}$
- Potencia total:  $P_{total} = T_{total} \cdot n_{nominal} = 34,15 \text{ W}$

Por lo tanto, es necesario contar con una potencia de tracción de 34,15 W. Dado que la topología de tracción es de tipo diferencial, ambos motores aportan a la potencia total de tracción, por lo que cada motor debe ser de al menos 17,08 W para poder alcanzar las especificaciones establecidas. Se buscó en diversos lugares por motores de esta potencia, en proveedores tanto locales como internacionales, tomando en cuenta el costo del producto y de envío.

Finalmente, se decidió utilizar unos motores de Digikey, modelo 80807015 del fabricante Crouzet. Los mismos utilizan una tensión de 12V, tienen una potencia de 17W y una velocidad nominal de 42 RPM. Aunque el valor de potencia es levemente menor a la obtenida en las cuentas, no se encontraron motores que tengan la potencia exacta y, por otro lado, el siguiente motor de mayor potencia implica un gran salto en el costo. Dado que la diferencia de potencia es pequeña y que se cuenta con un factor de seguridad del 50%, este modelo de motor será suficiente para alcanzar las especificaciones planteadas.



Figura 10-12 Motor a utilizar.

De la hoja de datos del fabricante se extrae el gráfico de la Figura 10-13, donde para una velocidad de 34 RPM se obtiene que el torque que entrega cada motor es de aproximadamente 2,2 Nm, suficiente para poder mover el vehículo con la carga. A menor velocidad los motores son capaces de entregar más torque, por lo que se cumplirán sin problemas las especificaciones de aceleración.

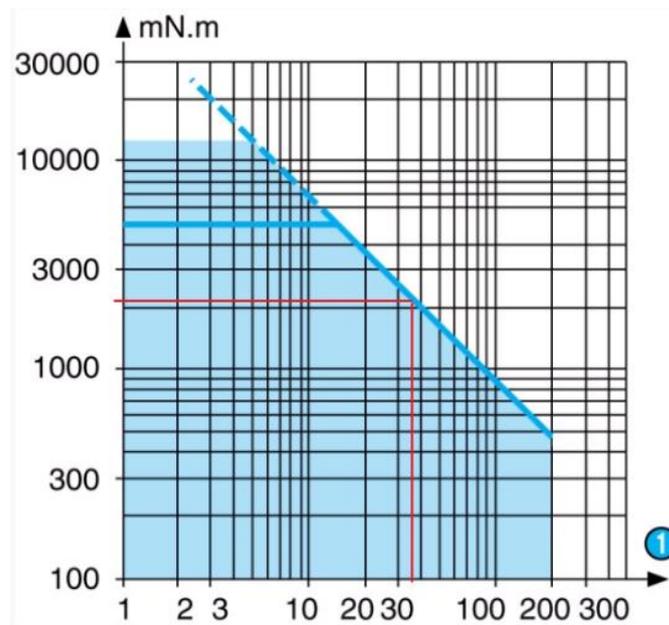


Figura 10-13 Curva de torque en función de RPM.

Vale la pena mencionar que los motores seleccionados son del tipo “motorreductor”, lo que quiere decir que ya cuentan con una etapa de reducción de engranajes incorporada. Por lo tanto, para poder acoplar el *encoder* y así poder medir la velocidad, es necesario que, a la hora de hacer el pedido, se solicite extender el eje del rotor del motor hacia atrás, de forma tal de poder acoplar un *encoder* según sea apropiado. Esto es posible de hacer, según está aclarado por el fabricante en la hoja de datos.

#### Sensor de velocidad

Se decidió utilizar *encoders* de tipo óptico, en contraposición a uno magnético, dada su mayor disponibilidad y menor costo. El sensor se acopla al eje del motor por la parte trasera, por lo que el eje del motor debe estar preparado para este tipo de aplicación. A la izquierda de la Figura 10-14 se puede ver este tipo de acople en la parte trasera del motor.



Figura 10-14 Motor con encoder de acople trasero y con disco ranurado.<sup>1</sup>

Por lo tanto, se definió utilizar un *encoder* de tipo disco ranurado como se puede ver en la imagen derecha de la Figura 10-14, donde se acopla un disco con ranuras al eje y un sensor óptico detecta cuando el haz de luz atraviesa una ranura y cuando no. Cada vez que el *encoder* detecta una nueva ranura, se puede conocer los grados que giró el motor.

El sensor óptico utilizado para fabricar el *encoder* de los motores es conocido como FC-03, y se puede ver en la Figura 10-15. El módulo cuenta con un circuito que, cuando se interpone un objeto entre el fotodiodo y el LED emisor, fija una tensión alta en una de sus salidas analógicas. Además, cuenta con una salida digital que limpia la señal proveniente del circuito de detección y provee una señal de flancos rápidos, aspecto esencial para poder detectar las ranuras cuando el disco del *encoder* gira a altas velocidades.



Figura 10-15 Sensor óptico utilizado para el encoder

---

<sup>1</sup> <http://carolina-sp.blogspot.com/2014/11/contador-de-pulsos-de-encoder-con.html>

### Controladores de motor

Para el controlador de los motores se priorizó la seguridad y la potencia máxima que es capaz de suministrar a los motores. Finalmente, teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, se decidió utilizar controladores de tipo puente H.

Según lo indicado en las especificaciones de los motores, estos pueden alcanzar un consumo de hasta 1,42 A en el punto de operación de máxima exigencia. Dado que se utiliza un puente H para cada motor, cada salida de control debe ser capaz de entregar 1,42 A de forma continua.

Un controlador de motores ampliamente conocido y de bajo costo es el integrado LM298, que contiene doble puente H y cuenta con características de seguridad. La corriente nominal que pueden soportar es de 2 A, por lo que resulta apropiado para esta aplicación.

Algo esencial de los componentes seleccionados es que cuentan con protección contra sobre temperatura y la posibilidad de utilizar el puente H para poner en corto circuito las bobinas del motor, logrando un tiempo de frenado más corto.

### Batería

Como se mencionó anteriormente, se buscaron baterías de plomo-ácido dado su mayor disponibilidad en el mercado y menor costo. Este módulo fue calculado con los demás módulos ya definidos.

A partir del consumo de cada módulo del AGV, se hicieron los cálculos de la capacidad mínima necesaria para alcanzar la autonomía planteada en las especificaciones. Un primer planteo de cómo calcular la capacidad requerida viene de la siguiente ecuación:

$$C = \bar{P}_{max} t_{autonomía}$$

Donde  $\bar{P}_{max}$  es la potencia promedio en el peor caso (el AGV en constante movimiento durante  $t_{autonomía}$ , con la carga máxima y encendiendo luces). Sin embargo, la variable mencionada debe ser desglosada y también se debe considerar que una batería no almacena idealmente toda la energía.

En primer lugar, las baterías de plomo ácido para descargas profundas nunca deben ser descargadas más del 80% para su correcto funcionamiento. Luego, las baterías pierden capacidad luego de sus ciclos de vida típico (pérdidas cercanas al 20% de la capacidad) y esto se debe tener en cuenta en el diseño. Para estas consideraciones se agregan los factores  $f_{descarga}$ ,  $f_{vida\ útil}$ .

En cuanto a la potencia mencionada, se la divide primero en dos variables:  $\bar{P}_{max} = \bar{P}_{mot\ y\ ctrl} + \bar{P}_{resto}$ . La variable  $\bar{P}_{mot\ y\ ctrl}$  representa el consumo de los motores, junto con sus pérdidas y las de los controladores. Al suponer el peor caso (transporte de carga máxima) se obtiene que la potencia de acarreo de los motores va a ser de 34W, por los modelos escogidos de motores y los cálculos de tracción. Para el consumo se presume un factor de pérdidas de  $f_{per} = 0,15$  entre los motores y el controlador.

$\bar{P}_{resto}$  representa el consumo de los demás módulos en promedio, el cual se estimó sumando los consumos típicos de los módulos siempre encendidos y agregándole el consumo de las dos tiras leds siempre encendidas (peor caso). Esto resultó en un  $\bar{P}_{resto} = 3,6W$ .

Por último, se agrega un factor de seguridad de un 50% a la capacidad en conjunto. De esta manera, la fórmula final para calcular la capacidad requerida viene dada por:

$$C = f_{seg} \frac{(\bar{P}_{resto} + f_{per} \bar{P}_{mot y ctrl})}{f_{descarga} f_{vida\ útil}} t_{autonomía} = 1,5 \frac{(3,6W + 1,15 \cdot 34W)}{0,8 \cdot 0,8} 25min$$

Lo cual para una batería de 12V resulta en una capacidad de  $C = 3,5 Ah$ . Sin embargo, esta es una capacidad baja para una batería de plomo ácido de alta descarga. Luego de una búsqueda de las ofertas de mercado, se encontró que la solución más apropiada era una batería YUASA NPX 25FR de 12v5Ah cuyo proveedor es MundoBaterías.

#### 10.1.4. Plan de pruebas de cada módulo

##### *Centro de comunicaciones*

Para probar el centro de comunicaciones, se programan los códigos de prueba en la placa de desarrollo WeMos D1 que vienen en las librerías. Primero, un código de prueba de un parpadeo del led interno de la placa para poder afirmar que se programó correctamente y luego programas que verifiquen que se puede conectar a través de internet. Por último, se verifica que cargando los códigos de prueba de UART tanto en la CIAA como en el WeMos, se pueden comunicar entre ellos a través del protocolo RS-232.

##### *Unidad de Proceso*

Para probar la CIAA, se debe asegurar que el entorno de desarrollo disponible para programar la computadora sea compatible con la placa. Se ejecutan diferentes proyectos de prueba incluidos en la plataforma y se observa que los resultados sean los esperados. En particular, prueban ejemplos que implementan tareas de FreeRTOS y de esta forma se corrobora que el microcontrolador sea capaz de soportar dicho sistema operativo y este pueda ser utilizado para la solución. La implementación de FreeRTOS se explica en mayor detalle en la sección 10.2.

Para este módulo, también se ponen a prueba los distintos periféricos que son necesarios para la implementación del sistema. Para estos simplemente se ejecutan rutinas demostrativas que ejemplifican el modo de uso de cada uno y se mide u observa que los resultados obtenidos sean los esperados.

##### *Sensor de navegación*

El sensor de navegación es evaluado ejecutando programas de pruebas de captura de imágenes, identificación de *tags* y binarización de imágenes a color. En cuanto a las comunicaciones, se utilizan programas de prueba en el módulo para comunicarse con la unidad de proceso y verificar su funcionamiento. Por último, se realiza esta comunicación a través del protocolo RS 485.

##### *Motores*

El punto crítico de los motores es que cumplan con las especificaciones de potencia que están detalladas en la hoja de datos. Como fue explicado en la sección anterior, la potencia que son capaces de entregar los motores determina el torque que pueden aplicar las ruedas para arrastrar la carga y la velocidad a la que se va a mover el vehículo. Luego, queda verificar que los motores sean capaces de entregar la potencia

especificada en su hoja de datos y que sean capaces de aplicar el torque y las velocidades necesarias para cumplir con los requerimientos.

Para esto se realizan ensayos de carga, tanto para el caso en que el motor está parado y debe aplicar un torque de aceleración, como para el caso en que el motor debe mantenerse a una velocidad constante para una carga determinada. Cabe destacar que, en los laboratorios del Instituto, se cuenta con el equipamiento necesario para realizar este tipo de ensayos.

Por otra parte, es necesario realizar ensayos de seguridad, de modo que los drivers del motor limiten por corriente para el caso en el que el eje del motor está sobrecargado. Para esto se realizan ensayos de rotor bloqueado y se verifica que los niveles de corriente no superen el máximo permitido de los motores gracias a que los controladores limitan la corriente. Además, se verifica que la temperatura de los motores no pase lo niveles especificados en la hoja de datos.

#### *Sensor de velocidad*

Es importante verificar la integridad de la señal de salida de los *encoder*. Por un lado, la señal debe estar libre de ruido eléctrico para prevenir que el microcontrolador, cuando mida esta señal, identifique pasos demás. Particularmente, se debe prestar especial atención al ruido que se puede inducir debido a los motores y el PWM que los controla. La cercanía del *encoder* a los motores puede ser un problema si no se toman medidas para prevenir ruido inducido.

Por otro lado, la señal de salida debe tener flancos rápidos. Para asegurar esto, se debe medir con un osciloscopio la salida del *encoder* y comprobar que, cuando el motor gira a la velocidad máxima, el tiempo de subida de la señal del *encoder* sea menor al período. Caso contrario, la señal no llegará a alcanzar un nivel de tensión suficiente para que el microcontrolador lo detecte.

#### *Controladores de motor*

Se debe comprobar las principales características de performance y de seguridad de los controladores.

Para el primer caso, se debe comprobar que es posible controlar la velocidad del motor con una señal de tipo PWM. Finalmente, es conveniente comprobar que el controlador puede operar a la corriente nominal de forma continua.

Por otro lado, llevando al controlador a su límite, se logrará que el mismo aumente temperatura y se debe verificar que interrumpe la operación por su protección interna.

#### *Batería*

El poder determinar con exactitud el estado de salud de una batería es un proceso complejo. Sin embargo, es posible hacer un estudio que nos brinde una idea aproximada del estado de esta. Para ello, se plantean dos pruebas diferentes.

Una prueba consiste en medir la tensión de la batería a circuito abierto, si la misma se corresponde con la tensión deseada, estaremos un paso más delante de corroborar el estado de la batería.

Otra prueba comúnmente utilizada en baterías es medir la resistencia interna de la batería para verificar su estado de salud. Sin embargo, el cambio de la resistencia con el paso del tiempo no es significativo, por lo cual resulta difícil medirlo.

Finalmente, otra prueba es medir el tiempo de descarga, teniendo en cuenta los Amper-hora (Ah) que indica, a modo de estudiar de forma aproximada la correspondencia entre la duración estimada y la duración real. Es sabido que los Ah brindados por el fabricante rara vez se corresponden de forma exacta con la duración real de la batería, pero esta prueba permite vislumbrar, en caso de existir, una diferencia considerable entre la duración real y la estimada.

#### *Sistema de seguridad*

En el caso del botón de emergencia con retención, la prueba consiste principalmente en corroborar su correcto accionamiento. Para ello, se conectó un multímetro en modo de medición de continuidad eléctrica y se verificó el paso de corriente al no estar presionado el botón de emergencia. Al presionar el botón, se cotejó que la retención del botón quede activada y, al mismo tiempo, no haya continuidad entre los contactos del interruptor. Finalmente se rota el pulsador para desactivar la retención y nuevamente se mide el paso de corriente.

Para el caso de la llave termomagnética, se sometió la llave a una corriente superior a la corriente nominal de la misma y se corroboró que la térmica se active correctamente. Además, una vez en el estado activo, se midió con un multímetro que no halla continuidad entre los terminales correspondientes del dispositivo.

Por último, para el caso de la placa de seguridad, debido a que esta consiste básicamente en un puente de conexión, se midió con un multímetro que haya continuidad entre las terminales correspondientes de la placa. A su vez, para probar que el diseño de la placa sea correcto, se sometió a la misma a las diferentes configuraciones de emergencia que pueden ocurrir y se midió que efectivamente se active la salida que frena los motores.

#### *Tablero de operaciones*

Para realizar las pruebas del tablero de operaciones es necesario recordar los elementos que lo componen, a saber: pulsadores con luz, llave termomagnética y luces de señalización.

La corroboración del funcionamiento de los pulsadores se realizó utilizando un multímetro en modo de medición de continuidad eléctrica. De esta forma, se observó el paso de la corriente al estar presionado el pulsador (ya que el mismo es del tipo normal abierto) y la no continuidad eléctrica en su estado libre. De la misma forma se comprobó el funcionamiento de la llave termomagnética.

En lo que respecta a las luces de los pulsadores y las luces de señalización, para verificar su funcionamiento, fueron conectadas a una fuente de 12V, se corroboró visualmente el encendido de estas y, adicionalmente, con un multímetro se midió la corriente consumida por cada luz. Las luces de los pulsadores consumen 12mA en el caso del pulsador verde y 18mA en el caso del pulsador azul, dando en conjunto un consumo total de 30mA. Por otro lado, las luces de señalización consumen, en el peor caso (es decir con la luz de emergencia y balizas encendidas en simultáneo), 120mA, dando así un consumo total conjunto de 240mA.

## 10.2. Software

Los módulos del diagrama funcional requieren algún grado de inteligencia para cumplir correctamente su función. Por lo tanto, cada uno de estos bloques requerirá un desarrollo de software que, junto con el hardware asociado, permitirá que el vehículo completo pueda operar correctamente.

En esta sección del documento se procede a detallar la componente de software presente en cada uno de esos bloques.

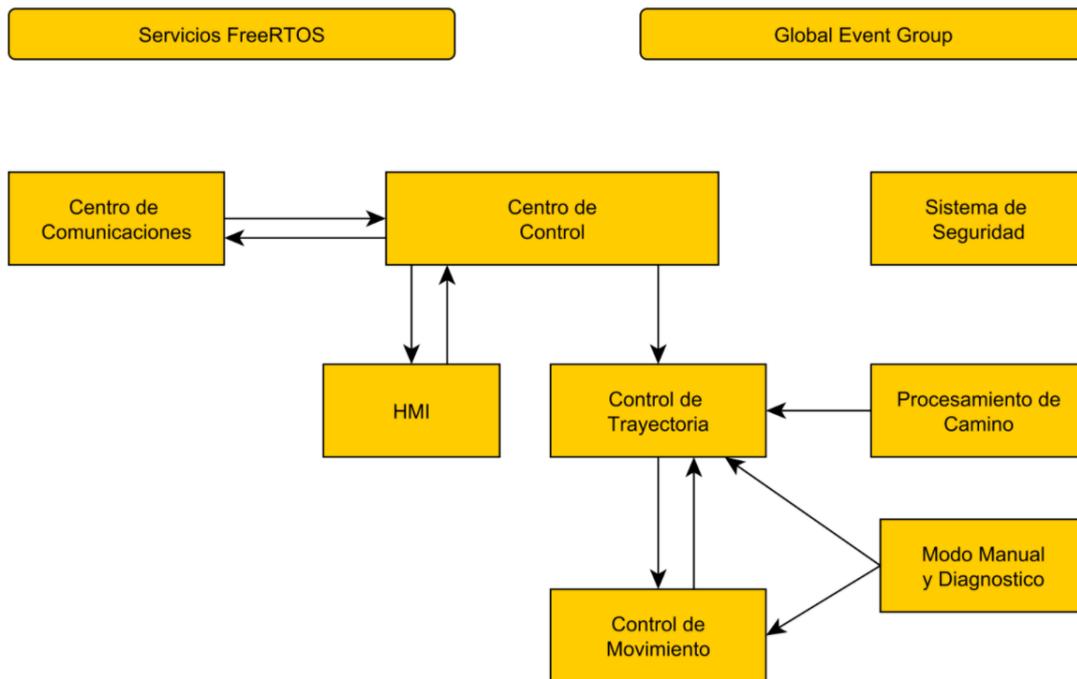


Figura 10-16 Diagrama modular de software

### 10.2.1. Estructura general de cada módulo

#### Centro de comunicaciones

La estructura del centro de comunicaciones se puede ver en la Figura 10-17. Debido a que este bloque se encarga de las comunicaciones con la red no cableada, la estructura resulta sencilla y auto explicativa.

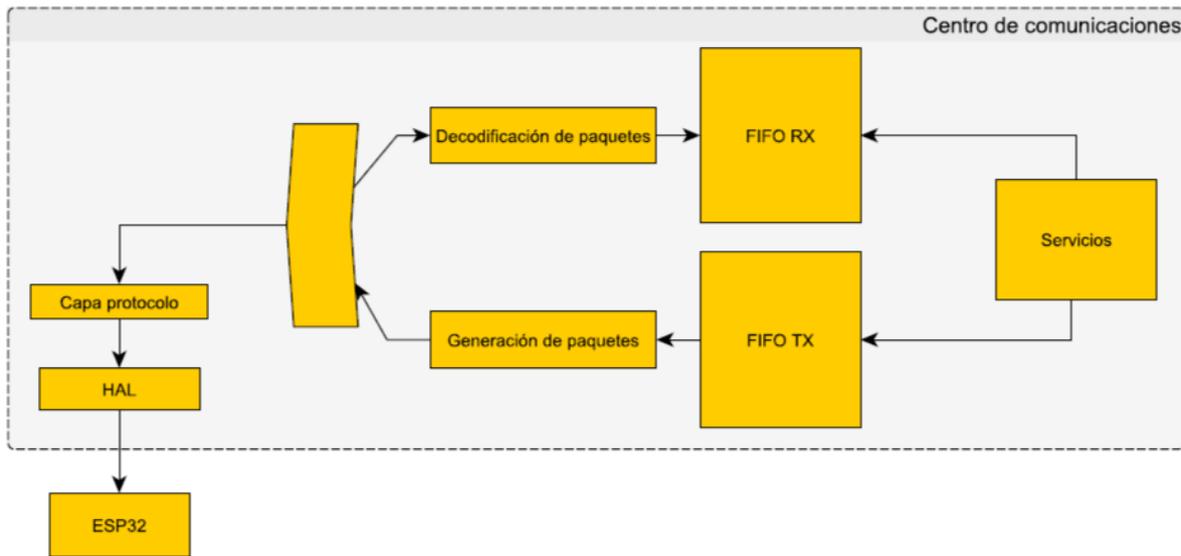


Figura 10-17 Diagrama en bloques del centro de comunicaciones

A través de los servicios, el centro de control podrá enviar y recibir datos del control central para aceptar o rechazar misiones, comunicar el estado del vehículo, mandar alertas, etc. Dicho módulo tendrá una memoria que le permitirá encolar mensajes tanto para enviar como para recibir.

Por último, el bloque externo con el que se comunica es el módulo ESP, cuya función es ser intermediario entre la CIAA y la red MQTT.

### Centro de control

El centro de control es el núcleo de operación del vehículo. Controla el estado de operación global del AGV y maneja la ejecución de las misiones que le son asignadas. Se conecta con los demás módulos a través de la red de eventos que define la arquitectura de la solución. La información de las misiones se transmite entre el centro de comunicaciones, el centro de control y el control de trayectoria a través de los canales de comunicación correspondientes. La estructura de software se puede ver en la Figura 10-18.

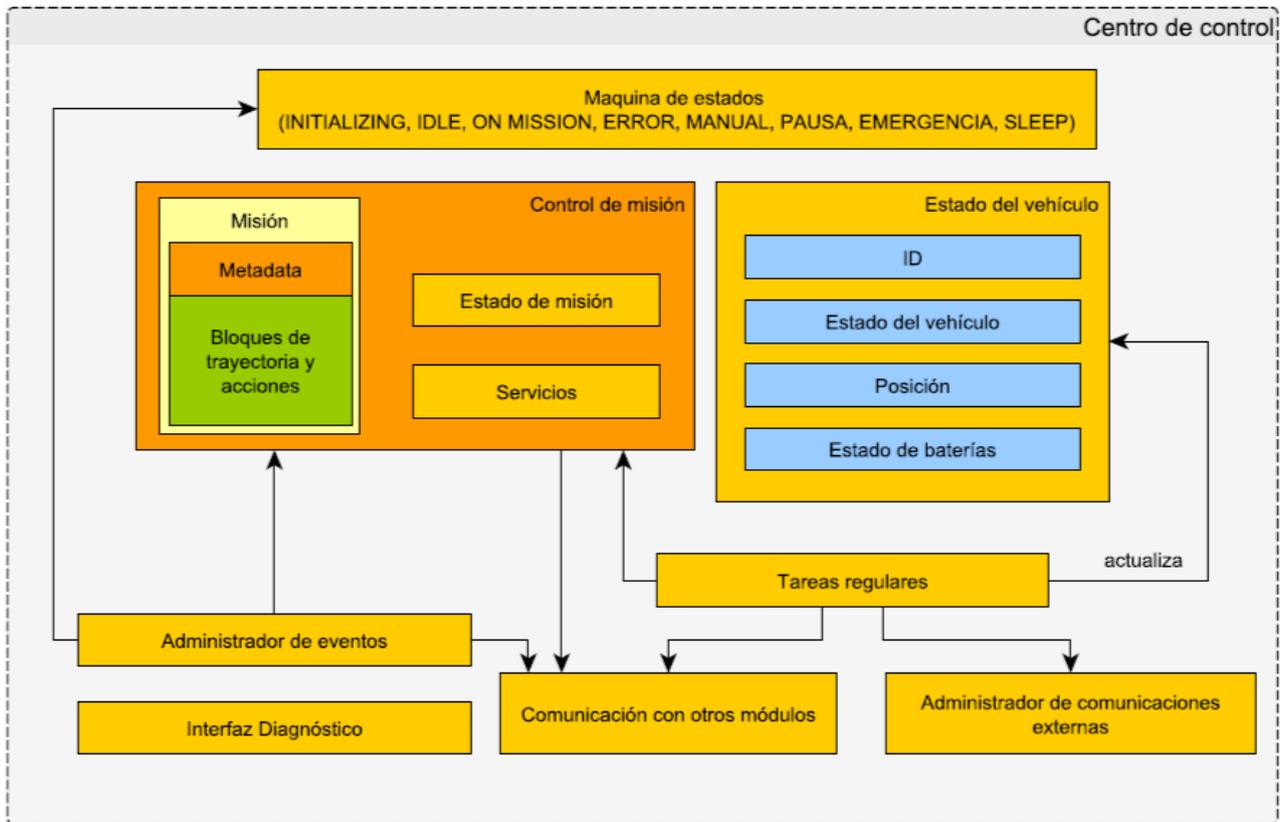


Figura 10-18 Diagrama en bloques del centro de control

Se pueden distinguir diferentes submódulos dentro del centro de control. En primer lugar, la máquina de estados regula el funcionamiento del AGV según el estado en el que se encuentra (EN MISION, IDLE, EMERGENCIA, etc.). Los diferentes módulos que componen el sistema activan eventos que impactan el estado del vehículo. Dependiendo del estado en el que se encuentre la máquina de estados, los eventos tendrán diferentes repercusiones. En la sección 10.2.2 se explica en detalle cómo es la transición de estados.

El submódulo de control de misiones se encarga de administrar lo referido a la misión que lleva a cabo el AGV. Siguiendo el flujo de transmisión de una misión, el paquete de información se recibe desde el centro de comunicaciones. Luego, el centro de control lo procesa y finalmente la transmite en bloques, al control de trayectoria. A medida que el vehículo avanza en la misión, el centro de control recibe dichos avances en forma de eventos y recibe como parámetro desde el control de trayectoria una estimación de la distancia recorrida. En el flujograma del centro de control se detallará en profundidad la secuencia de ejecución de una misión.

El centro de control también ejecuta tareas de forma periódica para mantener informado al centro de mando acerca del estado del vehículo, para corroborar que todos los módulos se encuentren funcionando correctamente y actualizar algunas variables de estado. En caso de que se identifique alguna falla en el sistema, el centro de control genera los eventos necesarios para que el vehículo se detenga y la operación pase al estado que corresponda.

Control de trayectoria

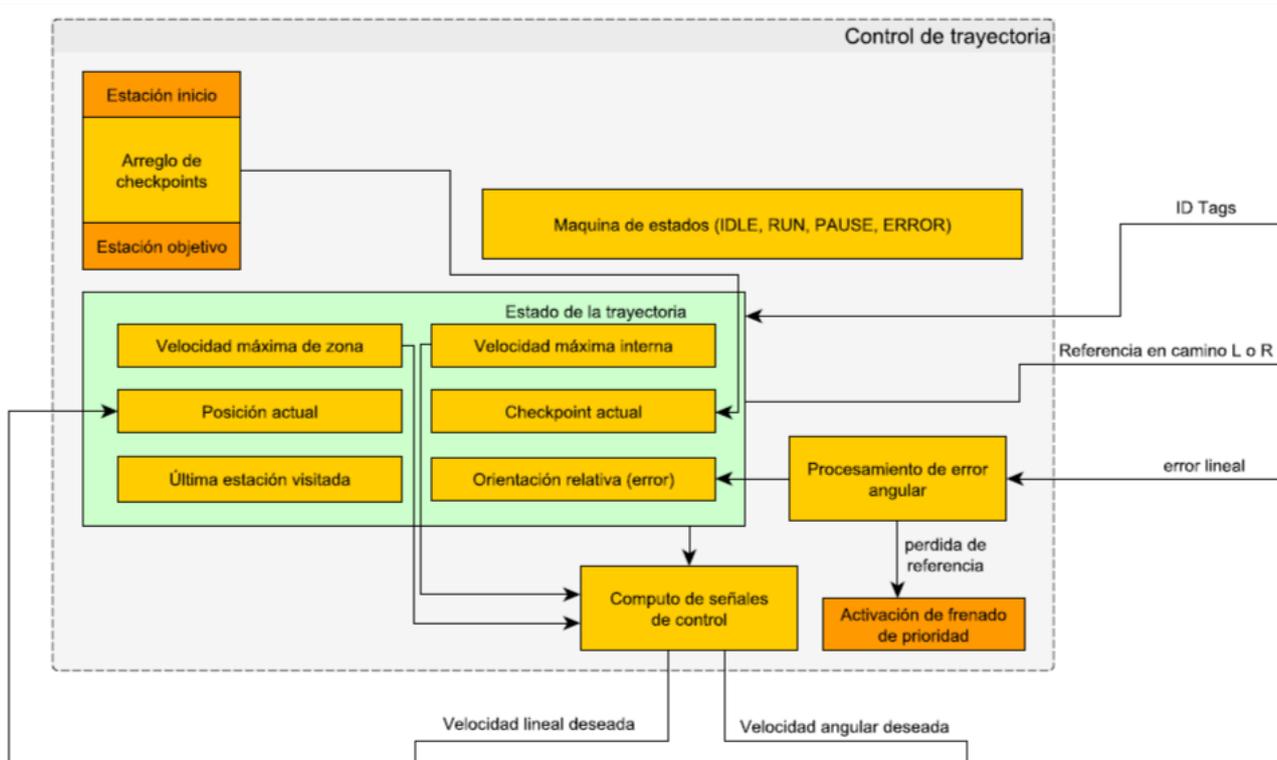


Figura 10-19 Diagrama en bloques del control de trayectoria

El control de trayectoria se encarga de dirigir el vehículo a través de la planta donde se encuentra trabajando. Cuando recibe un bloque de “checkpoints” (hitos por donde deberá pasar el vehículo) del centro de control, el control de trayectoria comandará al control de movimiento con el fin de ejecutar la secuencia de checkpoints. Para lograrlo, el control de trayectoria se comunica con el bloque de procesamiento del camino para recibir el desvío del vehículo respecto al centro de la pista, como también los tags dispuestos al costado del camino. Además, debido a que conoce el camino, fija la referencia para que el sensor de camino calcule correctamente el error al llegar a una unión (merge) o bifurcación (fork) de la pista. Este error es un error en distancia del centro del sensor de camino al centro de la pista, por lo tanto, es necesario convertirlo en un error de ángulo a partir de las dimensiones del vehículo, lo que dará la orientación relativa respecto a la trayectoria. Además, en caso de que el error sea superior a un límite fijado o que se pierda por completo la detección de la pista por un tiempo, el control de trayectoria ejecutará inmediatamente un frenado de prioridad para detener el vehículo.

Por último, se deben computar las señales de control que se le enviarán al control de movimiento para que realice el vehículo se mueva. Estas señales dependen de la velocidad máxima interna y de la zona siendo transitada, limitando siempre la menor de ambas; el tag que se recibió en caso de ser una estación y del error del vehículo, de forma tal que se puedan tomar precauciones si el error aumenta a niveles peligrosos.

### *Control de movimiento*

El control de movimiento se encarga de que el AGV se mueva a una determinada velocidad lineal ( $v$ ) y velocidad angular ( $\omega$ ). La física que comprende este movimiento está explicada en la sección 9.1.2 y 9.1.3. El módulo de software de control de movimiento asegura el control de  $v$  y  $\omega$  mediante un lazo de control PID, para cada una de las ruedas del vehículo. Como fue explicado anteriormente, la topología que implementa el vehículo es la diferencial, entonces, el movimiento de este reside en el control de la velocidad angular de cada rueda. Para lograr esto, el control de movimiento recibe como entrada la velocidad angular instantánea de cada rueda y mediante un algoritmo de control PID calcula la señal PWM necesaria para comandar la tracción de los motores. Los lazos de control de cada rueda son independientes entre sí, para cada una de las señales de referencia. El *setpoint* de velocidad angular de cada rueda queda determinado a partir de las ecuaciones 9-1 y 9-2.

El módulo también computa la distancia en metros recorrida. Con el parámetro de la velocidad angular de cada rueda, calcula la velocidad lineal del vehículo e integra esta para obtener un resultado de distancia. De esta forma, se puede obtener una estimación de la posición del vehículo dentro de la trayectoria de misión. Esta variable puede ser accedida desde el módulo de control de trayectoria, así, cuando el vehículo alcanza un nodo del sistema, el error de distancia se corrige a cero. Luego, el módulo de control de movimiento comienza a integrar la distancia recorrida de cero cada vez que se alcanza un nodo. En la Figura 10-20 se puede observar el diagrama en bloques del módulo. Como se mencionó anteriormente, este módulo recibe como parámetro las velocidades  $v$  y  $\omega$  deseadas, la velocidad angular instantánea de cada motor y da como resultado la señal de control PWM necesaria para comandar los motores.

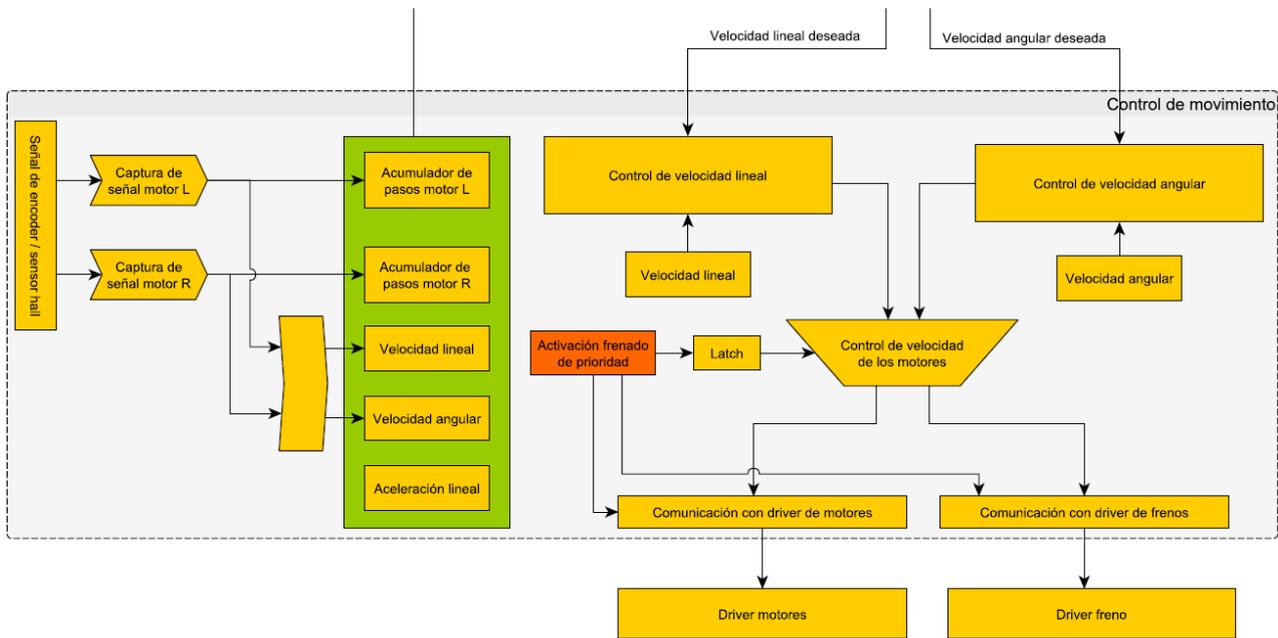


Figura 10-20 Diagrama en bloques del control de movimiento

*Sistema de seguridad*

El sistema de seguridad se encarga de mantener las funcionalidades de seguridad del vehículo y garantizar su operación segura. Para lograr esto, implementa dos características esenciales.

El sistema de seguridad se ejecuta desde una tarea del RTOS de mayor prioridad. Cada vez que se ejecuta, se llevan a cabo los controles de seguridad que incluyen la medición del estado de batería y el estado del botón de emergencia. En el caso de implementar, en el futuro, funcionalidades para detectar y evitar colisiones del vehículo con su entorno, el sistema de seguridad debería encargarse de ello.

Como segunda medida, el sistema de seguridad inicializa y mantiene el periférico de *Watchdog*. Este periférico del microcontrolador requiere, una vez inicializado, que el software llame una rutina que “alimente” el *Watchdog*. En el caso de que el software se cuelgue en algún ciclo infinito o el microprocesador deje de ejecutar las instrucciones, el *Watchdog* genera automáticamente un reinicio del sistema. Como se mencionó, la alimentación el *Watchdog* se hace desde el sistema de seguridad, por lo que se asegura que el mismo se ejecute de forma constante para que el AGV opere.

*Tablero de operaciones*

El tablero de operaciones presenta un interfaz hombre-máquina para informar estados al usuario del AGV, como también recibir eventos externos. Por un lado, debe ser capaz de generar las señalizaciones del vehículo, que incluyen señales luminosas. Por otro lado, debe realizar la lectura de las diferentes entradas del vehículo, que consiste en llaves y botoneras.

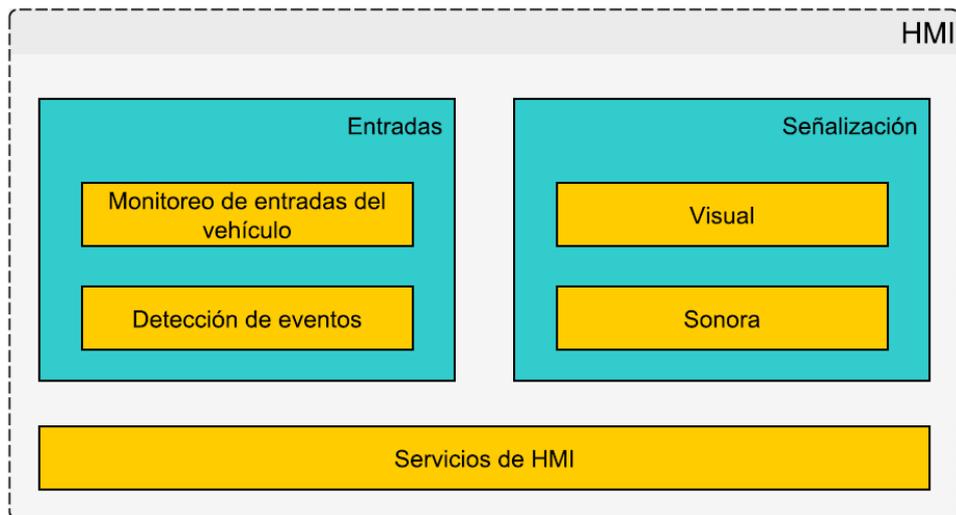


Figura 10-21 Diagrama en bloques del HMI.

Además, provee una interfaz de servicios que utilizarán otros módulos del software para recibir y enviar datos al tablero de operaciones.

En lo que respecta a las entradas del tablero, se tienen en consideración los dos pulsadores, en los cuales se mide el tiempo pulsado para así poder determinar pulsaciones cortas o largas, para obtener doble funcionalidad. El botón de emergencia, por su parte, al presionarse, no sólo desactiva los motores, sino que también envía una señal la cual indica el estado de parada de emergencia.

Respecto a las luces de los botones, estas serán activadas o desactivadas en función del estado en el que se encuentre la unidad, pudiendo indicar por medio de parpadeos o de luces estáticas distintos avisos como, por ejemplo, unidad en pausa o arranque de la unidad, entre otras. A su vez, se encuentran las luces de señalización, las cuales se activan siguiendo criterios similares para así poder indicar, por ejemplo, una parada de emergencia, un giro hacia la derecha o hacia la izquierda, el paso por una estación, entre otras.

#### *Procesamiento de camino*

El bloque de procesamiento de camino se encarga de interpretar el camino, devolviendo una señal de error al camino ideal. Este error depende también de qué camino se toma en bifurcaciones, lo cual es indicado por el control de trayectoria. Además de lo mencionado, este bloque se encarga de identificar *tags* y detectar si hubo pérdida de referencia del camino.

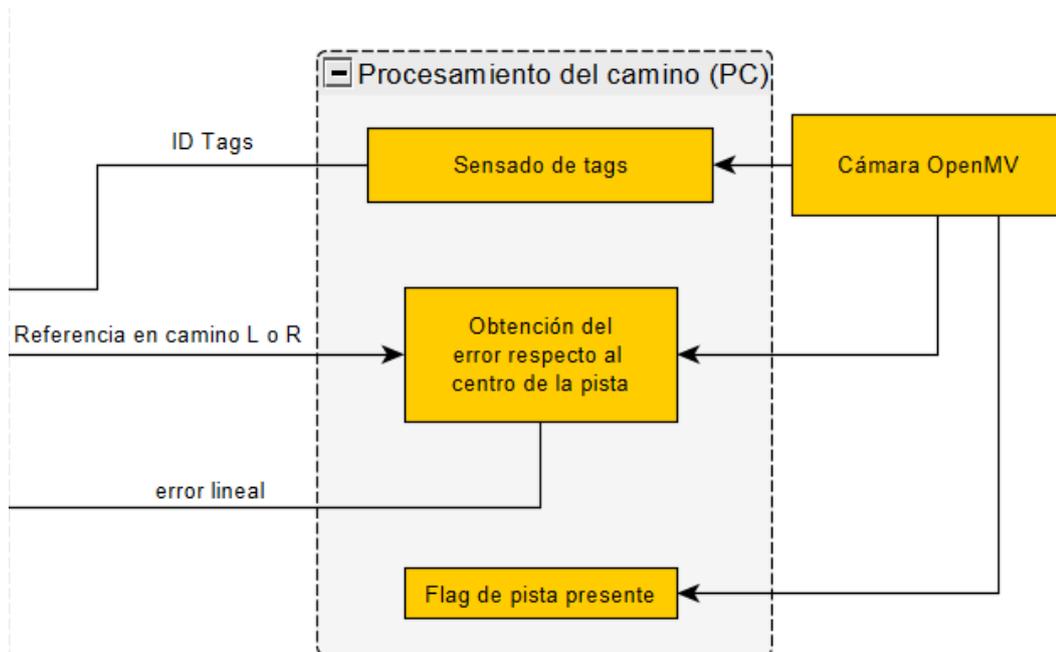


Figura 10-22 Diagrama en bloques del procesamiento de camino.

### 10.2.2. Diagramas de estados y flujogramas

En esta sección se presentarán en detalle los principales bloques de software, dentro de los que ya se encuentran definidos según fue explicado en la sección 10.2.1.

#### *Centro de comunicaciones (Externo – WeMos D1 Mini)*

El centro de comunicaciones está tanto en la CIAA como en la placa WeMos D1 Mini. La última placa tiene la simple función de enviar por MQTT los mensajes recibidos por UART y enviar por UART los mensajes recibidos por MQTT. Para ello se desarrolló un código de software cuya lógica puede ser resumida en la Figura 10-23.

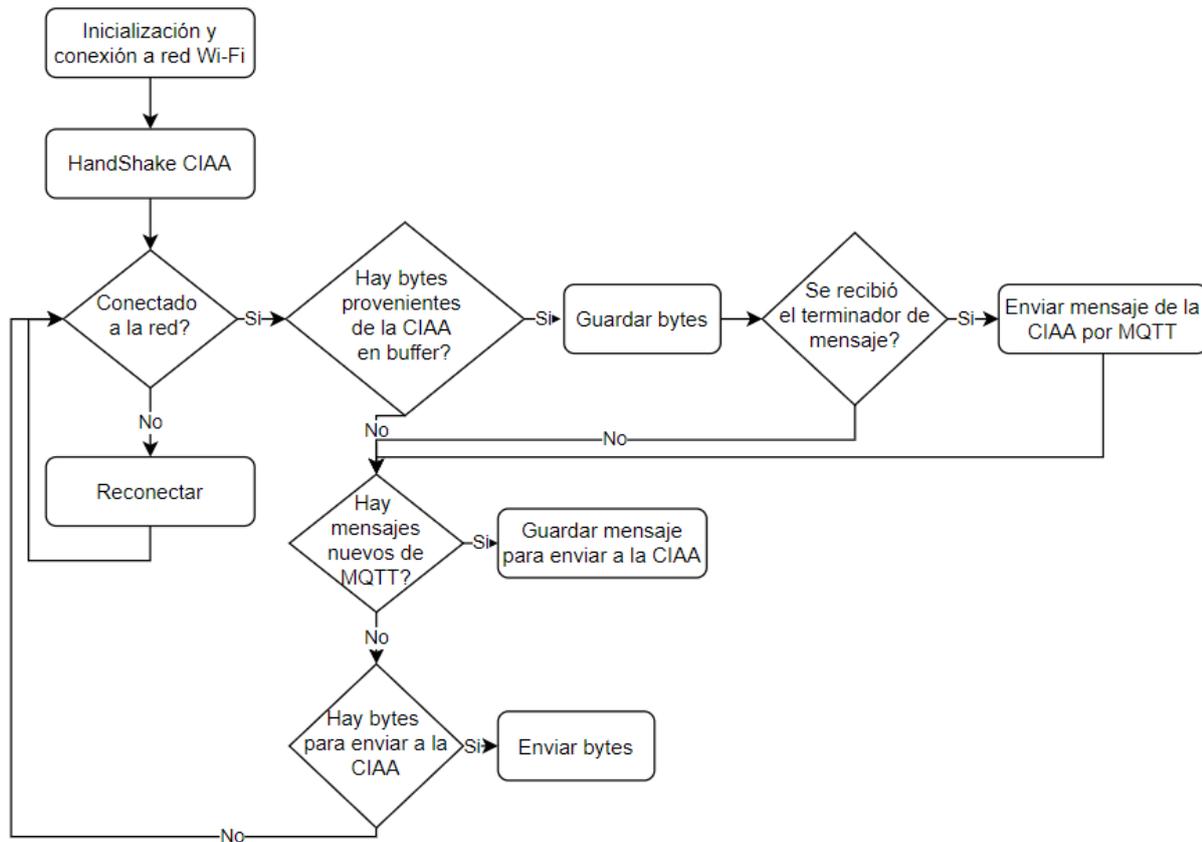


Figura 10-23 Flujograma del código en el ESP

El código aprovecha buffers internos del controlador de UART de manera de hacer el código no bloqueante. Por ello periódicamente se fija los bytes recibidos en el buffer y los pasa a una memoria del programa al guardarlos. En cuanto al envío de los bytes por UART, lo que se hace es llenar el buffer interno del controlador con bytes para enviar. De esta manera se usa eficientemente el tiempo de ejecución y la estructura interna del controlador UART.

Además de ser un traductor de protocolo MQTT a UART, revisa continuamente su estado de conexión y en caso de desconexión, se reconecta. Una función adicional no mencionada en el diagrama es que, si al cabo de un tiempo no recibe un mensaje de la CIAA, envía un mensaje aclarando que sigue conectado. Esto no fue diagramado pues desde la CIAA siempre se envía un mensaje cada menos tiempo.

*Centro de comunicaciones (Interno – CIAA)*

En cuanto a la parte interna a la CIAA del centro de comunicaciones, las rutinas de envío y recepción de mensajes se encuentran detalladas en la Figura 10-25 y la Figura 10-24, respectivamente. La recepción se codificó como una rutina de interrupción, mientras que la de envío como una tarea periódica por simplicidad del uso del controlador de UART. Cabe destacar que en estos gráficos se entiende por la lectura de bytes a la copia del buffer de entrada del controlador UART a una memoria del programa, y la escritura de bytes como la copia de memoria interna al buffer de salida del controlador UART.

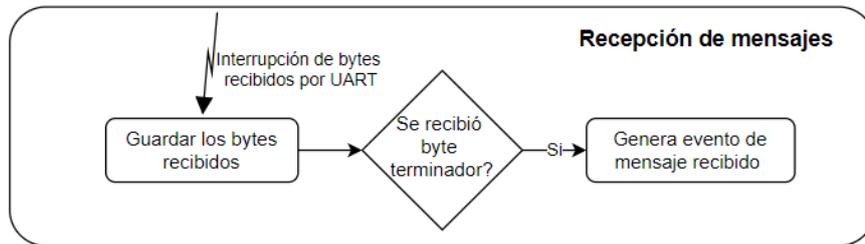


Figura 10-24 Flujograma de recepción de mensajes

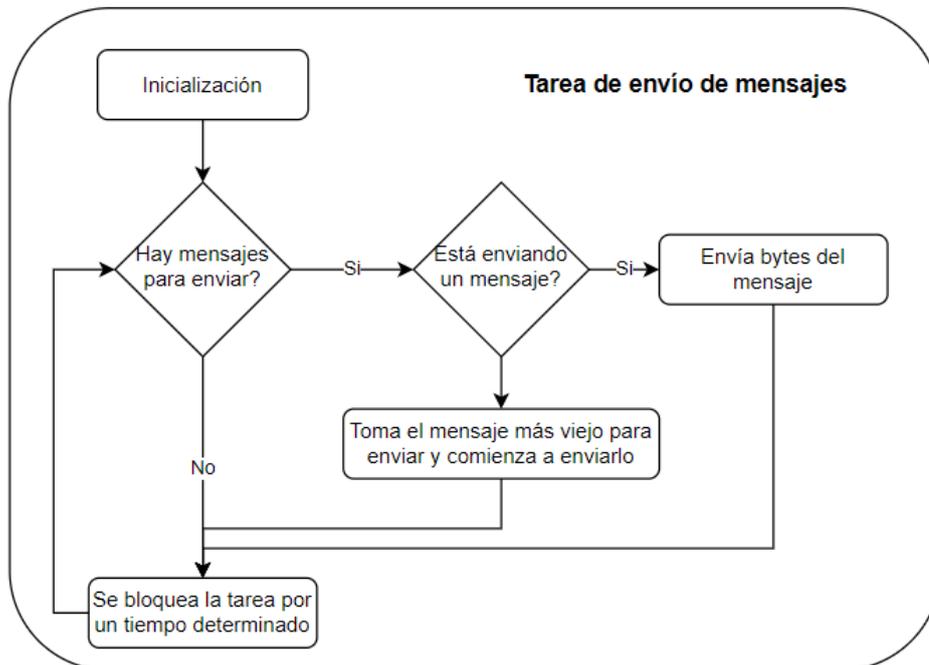


Figura 10-25 Flujograma de envío de mensajes

Además de las rutinas mencionadas, el centro de comunicaciones tiene funciones para decodificar mensajes en estructuras internas y rutinas para encolar mensajes a enviar. Estos son detallados posteriormente.

*Centro de control*

Debido a la complejidad del centro de control, resulta conveniente utilizar un esquema de máquinas de estados para llevar a cabo las funciones de este. Esto nos permite que eventos iguales generen respuestas distintas según el estado en el que se encuentra el AGV. En la Figura 10-26 se puede apreciar el diagrama de estados del centro de control, con las transiciones según los eventos que se detectan.

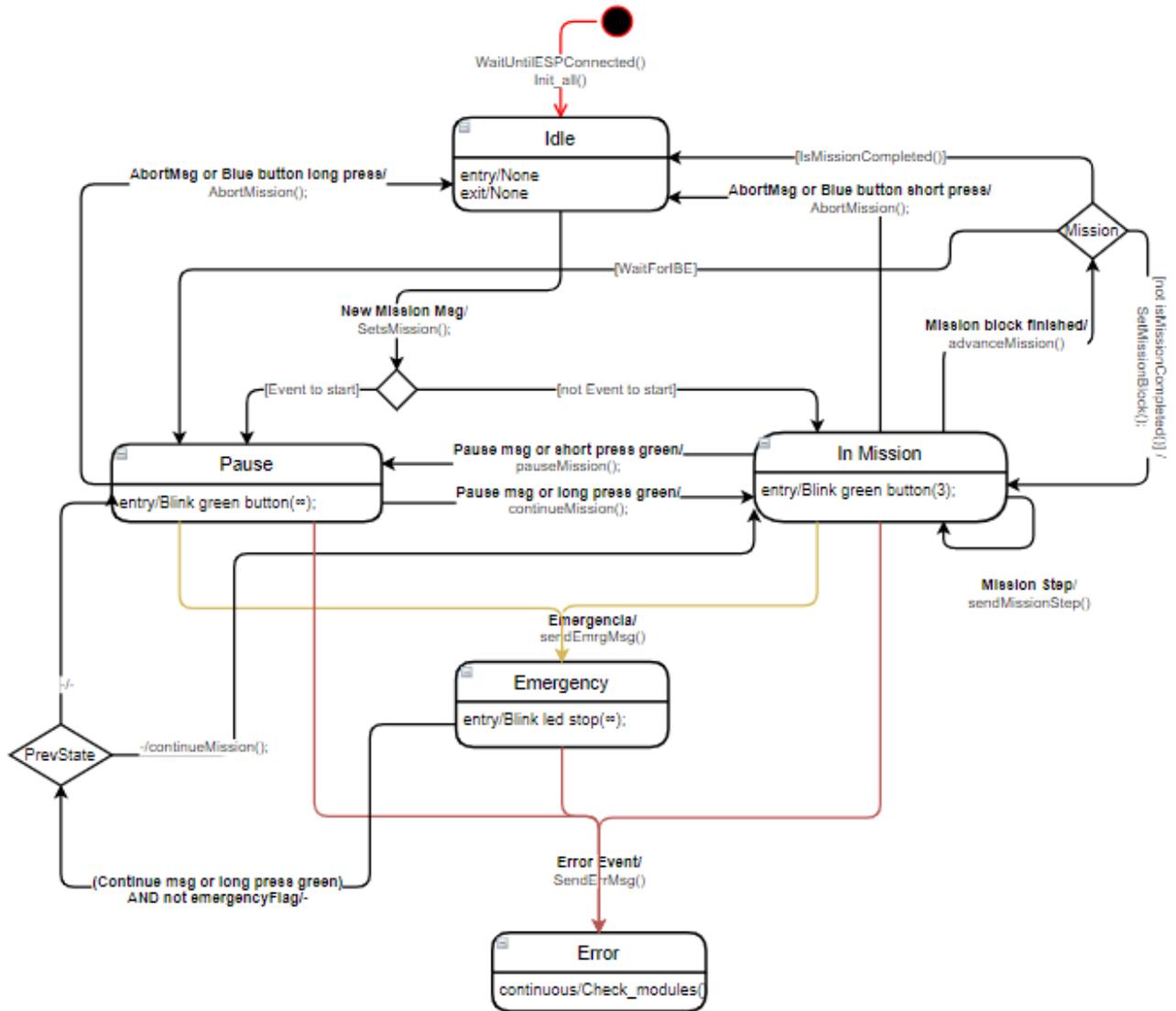


Figura 10-26 Diagrama de estados del centro de control.

Cabe destacar que este diagrama está simplificado y cada acción es notificada a través de la red no cableada al centro de comandos. Los estados representan las siguientes situaciones:

- **Idle:** Vehículo esperando por una nueva misión.
- **In Mission:** El AGV tiene asignada una misión y se encuentra en movimiento.
- **Pause:** El AGV tiene asignada una misión, pero está detenido por voluntad del usuario, por indicación del centro de comandos o por una parada programada en la misión.
- **Emergency:** El sistema de seguridad detectó una situación de emergencia durante una misión, y se espera confirmación para volver a operar correctamente.
- **Error:** Luego de una falla catastrófica del sistema. Solo se puede remediar a través de la interfaz de diagnóstico o reiniciando el dispositivo.

#### *Control de trayectoria*

El control de trayectoria contará con 4 estados individuales:

- **Idle:** no se está procesando el camino ni comandando el movimiento del vehículo. El control se encuentra esperando un camino para recorrer.
- **Run:** el vehículo se encuentra en movimiento. Se detecta la pista para mantener el vehículo sobre el camino y se detectan los *tags*. En este estado se comanda el control de movimiento para lograr cumplir con un bloque de *checkpoints* recibido. En este estado se activa la tarea de misión, la cual se encuentra detallada en la Figura 10-28.
- **Pause:** el bloque de misión se encuentra pausada.
- **Error:** se detectó un error por lo que no se puede continuar con la trayectoria.

En la Figura 10-28 se muestra el diagrama de flujo para cada uno de los estados del control de trayectoria.

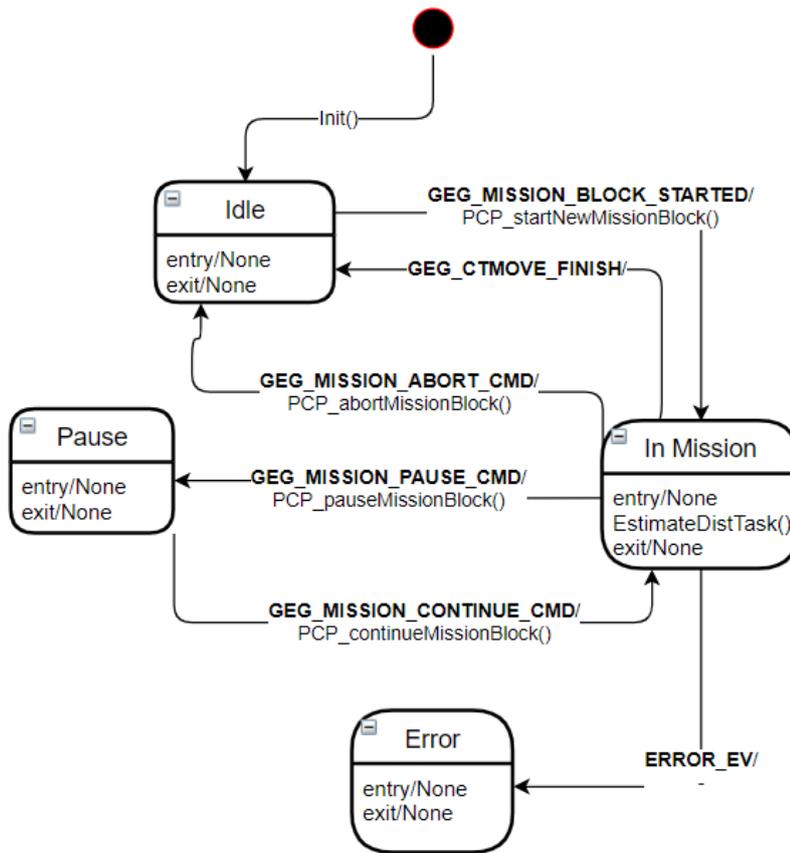


Figura 10-27 Diagrama de estados de centro de trayectoria.

Cuando se está procesando un bloque de misión, la tarea que cumple aquella función se puede explicar con el diagrama de la Figura 10-28. Cabe destacar que el OpenMV está configurado para que envíe periódicamente los mensajes necesarios para el procesamiento.

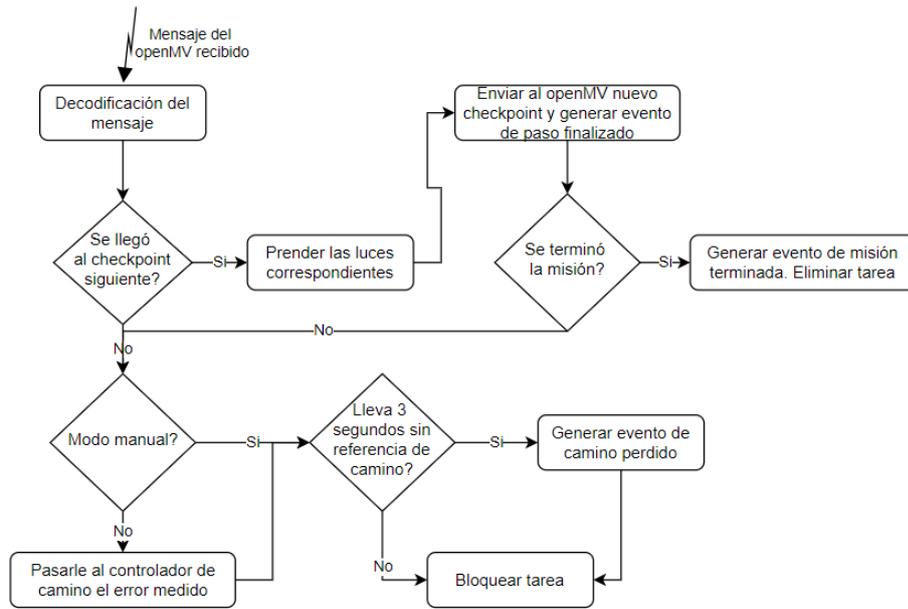


Figura 10-28 Diagrama de flujo de tarea de misión

*Procesamiento de camino*

El bloque de procesamiento de camino es procesado por del OpenMV. El código utilizado ejecuta una rutina cada vez que llega un mensaje de la CIAA. En condiciones normales de medición, dichos mensajes son periódicamente enviados por la CIAA. Los pasos de la rutina son ilustrados en la Figura 10-29.

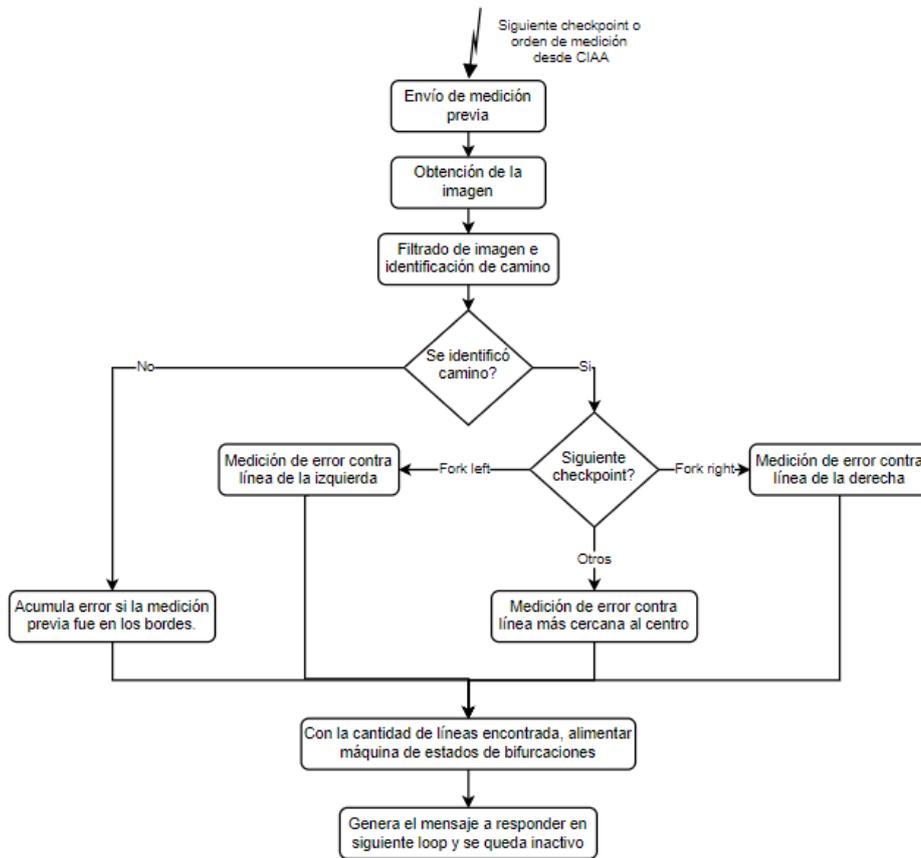


Figura 10-29 Diagrama de flujo de rutina de medición de OpenMV.

En cuanto al manejo de bifurcaciones, la lógica fue desarrollada con una máquina de estados. La Figura 10-30 muestra su simple lógica, y la variable modificada es uno de los parámetros que se envía en los mensajes a la CIAA.

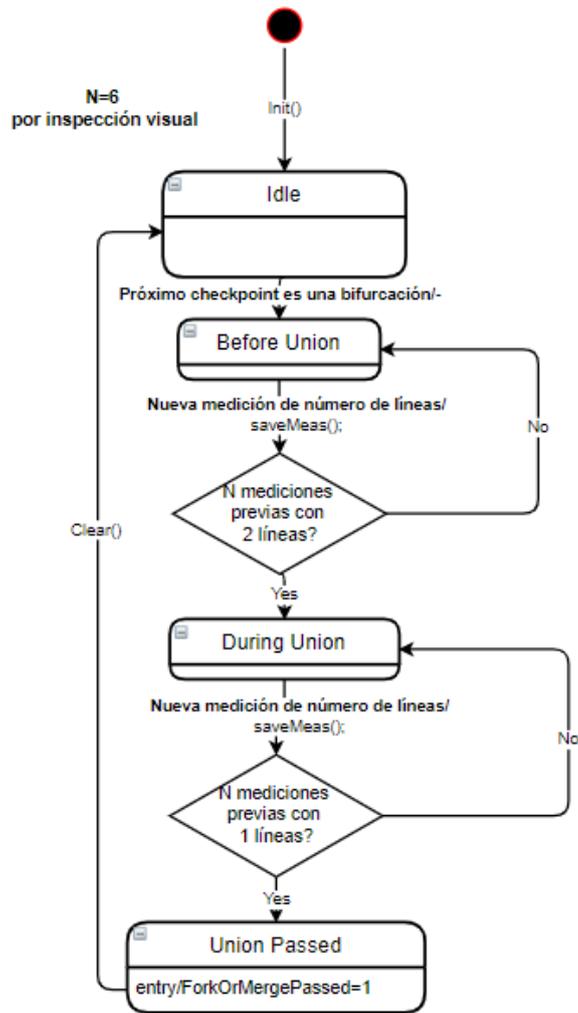


Figura 10-30 Máquina de estados de detección de bifurcaciones.

*Control de movimiento*

El control de movimiento procura que el vehículo siga la velocidad lineal y angular, definidas por el control de trayectoria. Esto es un proceso continuo por lo que no requiere una estrategia de software basada en estados. En la Figura 10-31 se puede ver el diagrama de flujo para este bloque.

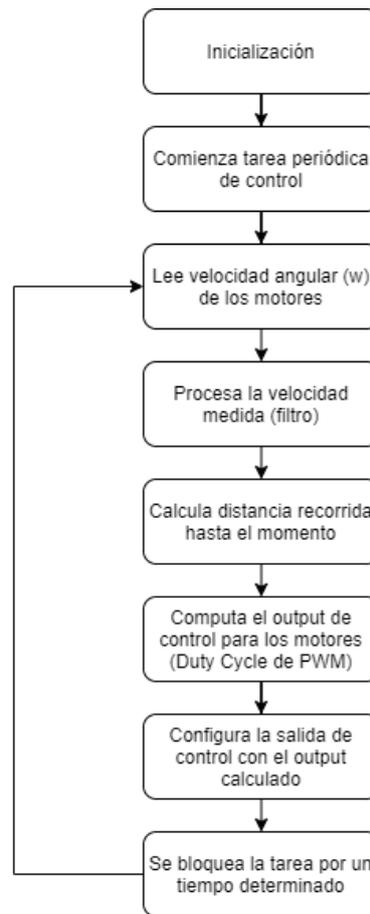


Figura 10-31 Diagrama de flujo del control de movimiento.

Como se puede observar, este módulo tiene una tarea principal que se repite de forma periódica. Esta es la implementación final del lazo de control PID, que determina la velocidad angular de los motores. En la etapa de cómputo, toma como variables la medición obtenida en la etapa anterior y el *setpoint* definido por el control de trayectoria. Luego, obtiene la salida que controla el sistema que representan los motores. Esta tarea se debe repetir de forma periódica para que el control PID se pueda resolver como un problema discreto. En la Figura 9-6 se puede observar cómo queda implementado dicho lazo de control en el producto

### 10.2.3. Descripción detallada del software

Teniendo en cuenta la arquitectura general de software explicada en la sección 10.2.1, podemos analizar en detalle la implementación de esta. El proyecto está desarrollado sobre FreeRTOS [12], un sistema operativo diseñado para aplicaciones en tiempo real. Este facilita una serie de funcionalidades para el manejo de eventos, tareas periódicas o activadas por eventos, prioridad de tareas, colas de mensajes para los canales de comunicación y administración de recursos. En particular, la solución del AGV utiliza la funcionalidad de EventGroups, EventQueues, Timer, TaskNotifications y el módulo de TaskManagement de FreeRTOS como base de todas las operaciones.

Cada uno de los módulos del sistema tiene una tarea o una serie de tareas que comprenden la funcionalidad de este. Estas tareas son una *Task* de FreeRTOS, con la posibilidad de ejecutarse de forma periódica o cada vez que se active uno o varios eventos. A su vez, la estructura de eventos a la que hacemos referencia se apoya en la funcionalidad de *EventGroups* que facilita el RTOS. Esto hace que el desarrollo de la aplicación sea más fácil y la hace más segura.

En la Figura 10-32 se muestra la estructura de archivos del proyecto. En esta se puede observar cómo se organizó el proyecto y las dependencias entre los módulos. También refleja cómo es que la aplicación se apoya sobre el *kernel* de FreeRTOS y aprovecha la estructura de eventos como canal de comunicación entre los bloques.

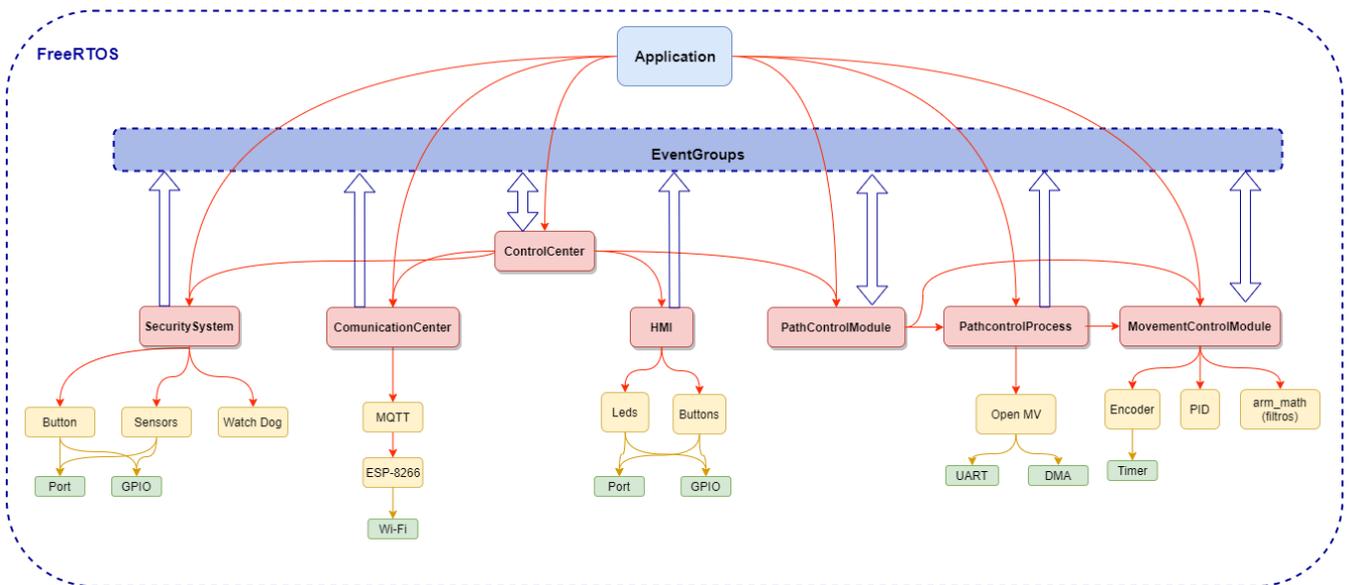


Figura 10-32 Diagrama general de archivos

*Descripción de los eventos globales*

Como se explicó anteriormente, cada uno de los módulos consiste en una tarea o serie de tareas, que son ejecutadas de forma periódica o a partir de una serie de eventos. Como se explicó anteriormente, cada uno de los módulos consiste en una tarea o serie de tareas, que son ejecutadas de forma periódica o al ocurrir algún evento. En la Tabla 10-2 se detalla cada uno de los eventos que pueden ser activados, que módulo los puede ejecutar y que módulos tienen tareas que son activadas el evento.

| Bit | Nombre del evento          | Seteado por      | Leído por  | Origen del evento   |
|-----|----------------------------|------------------|------------|---|
| 0   | GEG_EMERGENCY_STOP         | SS               | CC, CT, SS | Botón de emergencia presionado  |
| 1   | GEG_PRIORITY_STOP          | CC, COMS, CT, SS | CC, CT, SS | Objeto identificado en zona de colisión inminente (no utilizado)          |
| 2   | GEG_CONTINUE               | CC               | CC, CT, SS | Llegada de comando que indica continuar misión                            |
| 3   | GEG_COMS_ERROR             | COMS             | CC         | Error en la decodificación de mensajes                                    |
| 4   | GEG_COMS_RX                | COMS             | CC         | Mensaje recibido  |
| 5   | GEG_CTMOVE_FINISH          | CT_MOVE          | CC, CT, SS | Finalización de bloque de misión  |
| 6   | GEG_CTMOVE_ERROR           | CT_MOVE          | CC, CT     | Error en el seguimiento de camino, en principio por pérdida de referencia |
| 7   | GEG_MISSION_STARTED        | CC               | CT, SS     | Inicio de nueva misión  |
| 8   | GEG_MISSION_PAUSE_CMD      | CC               | CT, SS     | Pausado de misión activa  |
| 9   | GEG_MISSION_ABORT_CMD      | CC               | CT, SS     | Aborto de misión  |
| 10  | GEG_LOW_POWER              | CC               | COMS, HMI  | Comando recibido para ir a un modo de bajo consumo (no utilizado)         |
| 11  | GEG_OBJECT_IN_ZONE_2       | SS               | CC, CT     | Objeto identificado en zona de advertencia (no utilizado)                 |
| 12  | GEG_MISSION_STEP_REACHED   | CT_MOVE          | CC, CT     | Checkpoint de misión hallado  |
| 13  | GEG_CM_ERROR               | CM               | CC         | Error en el centro de movimiento  |
| 14  | GEG_SS_ERROR               | SS               | CC         | Error en el sistema de seguridad  |
| 15  | GEG_HMI                    | HMI              | CC         | Botón del tablero presionado  |
| 16  | GEG_EMERGENCY_BUTTON_FREED | SS               | CC         | Botón de emergencia liberado  |

Tabla 10-2 Eventos globales

Es necesario destacar que en los eventos de mensaje recibido (GEG\_COMS\_RX) y del HMI (GEG\_HMI), la información más específica se obtiene de subrutinas de cada bloque de programación.

En la siguiente tabla se definen los acrónimos para cada uno de los módulos.

| Módulo                   | Acrónimos |
|--------------------------|-----------|
| Centro de comunicaciones | COMS      |
| Centro de control        | CC        |
| Control de trayectoria   | CT        |
| HMI                      | HMI       |
| Sistema de seguridad     | SS        |
| Procesamiento de camino  | CT_MOVE   |

Tabla 10-3 Definición de acrónimos para los módulos

#### Centro de comunicaciones

##### Descripción de la configuración de la red MQTT

El esquema de la red MQTT cuenta con una computadora donde se ejecuta la aplicación de usuario. Este dispositivo deberá estar conectado a través de una red LAN con el *broker*, cuya función es repartir los mensajes. Se aclara que en la validación y en la prueba del prototipo, la aplicación de usuario y el *broker* se ejecutaban en la misma computadora.

Los AGVs de la red estarán conectados a la misma red LAN a través de *Wi-Fi*, cuya señal es provista por *routers* ubicados sistemáticamente distribuidos para cubrir todo el trayecto de AGVs. En la red, los dispositivos publican a Houston los mensajes que envían junto con un *header* que indique que AGV lo envía y escuchan al tópico relativo a su número. La aplicación de usuario está suscripta al tópico Houston y puede enviarle instrucciones a cualquier AGV. De esta manera, el diseño es fácilmente escalable para una mayor cantidad de AGVs, y también permitiría la comunicación entre AGVs en el futuro.

El *broker* utilizado fue el "Eclipse mosquito" por ser de código abierto y con una comunidad muy activa.

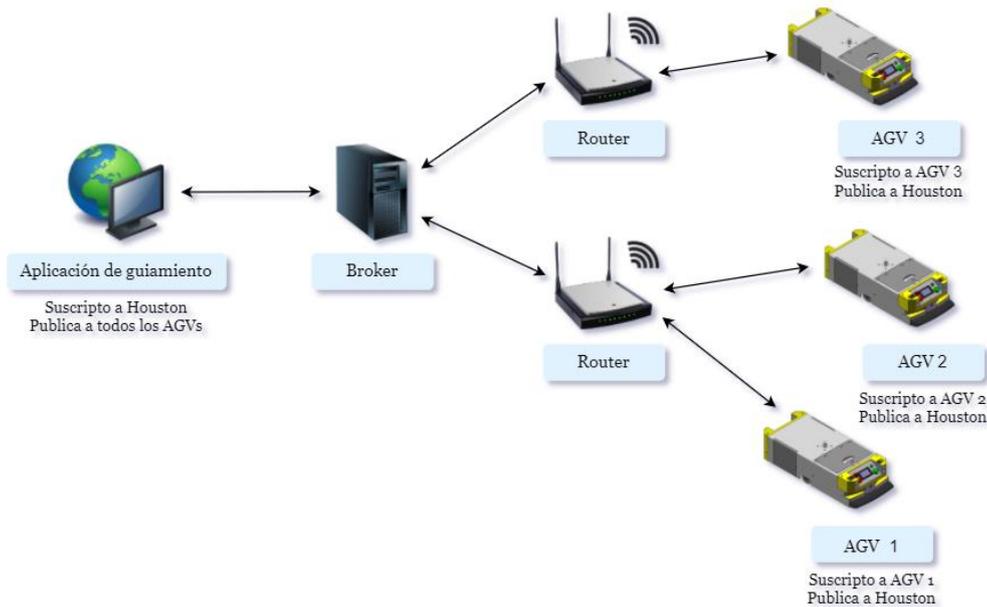


Figura 10-33 Estructura ilustrativa de la red de AGVs

#### Handshake entre CIAA y WeMos D1

En la inicialización del AGV se necesita sincronizar el estado de operación entre la CIAA y la placa que se comunica por *Wi-Fi*, debido a sus diferentes tiempos de arranque y que el número de AGV es cargado solamente en la CIAA. Por este motivo se realiza un *handshake* en la comunicación, que consta de los siguientes pasos:

- Ambas placas inicializan su código, pero la CIAA espera una cantidad de tiempo apreciable para asegurar que la placa WeMos D1 ya se inicializó. En la iniciación de la placa WeMos se espera recibir un mensaje "Reset" de la CIAA.
- La CIAA envía el mensaje "Reset" al iniciar el centro de comunicaciones interno, a lo que la placa WeMos responde con un caracter una vez que se logró conectar a la red *Wi-Fi*.
- La CIAA envía el número de AGV, la placa WeMos retiene la información para saber a qué tópico suscribirse y el encabezado a utilizar.
- Por último, la CIAA espera recibir un caracter indicando que terminó el *handshake*.

#### Protocolo de comunicación entre el AGV y centro de operaciones

Los mensajes que se envían entre el centro de operaciones y el AGV se fijaron con los mensajes descriptos en las siguientes tablas:

| Significado                    | Estructura del mensaje            | Aclaraciones   |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Primera conexión               | "Online"                          | Este mensaje se envía al inicializarse el AGV  |
| Conexión en pie                | "HB"                              | -  |
| Aceptación de misión           | "Quest\nYes"                      | Al recibir una misión, comunica que la acepta  |
| Rechazo de misión              | "Quest\nNo"                       | Al recibir una misión, comunica que la rechaza   |
| Misión pausada                 | "Quest paused"                    | Comunica que se pausó la misión  |
| Misión abortada                | "Quest aborted"                   | Comunica que se abortó la misión   |
| Misión resumida                | "Resumed"                         | Comunica que se continuó la misión luego de una pausa o una emergencia.  |
| Checkpoint alcanzado           | "Quest step reached"              | Al llegar a uno de los <i>checkpoints</i> del bloque de la misión, se envía este paquete   |
| Reporte de estado              | "Status\nBattery:%d\nDistance:%d" | Este paquete reporta periódicamente la tensión de la batería y la distancia estimada recorrida desde el último <i>checkpoint</i> . La tensión de batería se expresa en decenas de mV y la distancia en cm. |
| Botón de emergencia presionado | "Emergency stop"                  | Mensaje enviado al apretarse el botón de emergencia  |
| Botón de emergencia liberado   | "Emergency button freed"          | Al girar el botón de emergencia previamente accionado, se envía este mensaje   |
| Evento entre bloques dado      | "Interblock event"                | Cuando se dio el evento entre bloques esperado, generalmente el botón presionado, se envía este mensaje  |
| Error                          | "Error\n%s"                       | Al tener una falla catastrófica se envía este mensaje y luego el mensaje que describe el error.  |

Tabla 10-4 Mensajes que envía el AGV

| Significado          | Estructura del mensaje | Aclaraciones   |
|----------------------|------------------------|--|
| Envío de misión      | "Quest?\n%s"           | <p>Se envía la misión codificada en texto, esperando la respuesta de aceptación o no del AGV. Para la codificación, se utilizan 2 caracteres para indicar <i>checkpoint</i> u orden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bs: Empieza bloque de misión</li> <li>• Be: Finaliza bloque de misión</li> <li>• Ho: Evento de continuado por centro de comandos</li> <li>• No: Ningún evento para continuar</li> <li>• Bu: Evento de presionado de botón</li> <li>• St: Estación</li> <li>• Fr / Fl: bifurcación a la derecha/izquierda</li> <li>• Me: unión</li> </ul> <p>El orden del mensaje es una lista de: evento entre bloques seguido de la descripción del bloque de misión. El bloque de misión empieza con Bs, termina con Be y está comprendido por una lista de: Distancia hacia el <i>checkpoint</i>, <i>checkpoint</i>. Ej:</p> <p>NoBs100FI50Me150StBeBuBs150StBeHo150Fr100StNo</p> |
| Pausado de misión    | "Pause"                | Comunica que se pausó la misión desde el centro de comandos.   |
| Continuado de misión | "Continue"             | Comunica que se continúa la misión desde el centro de comandos. Este mensaje se utiliza también para el evento entre bloques de continuación por centro de comandos.   |
| Aborto de misión     | "Quest abort"          | Comunica que se abortó la misión desde el centro de comandos.  |

Tabla 10-5 Mensajes enviados por el centro de comandos

Cabe aclarar que los mensajes enviados por el AGV tienen siempre un encabezado que indican el número de AGV que lo publicó cuya estructura es "AGV N\n" y luego continúa el mensaje.

#### Subrutinas de de/codificación de mensajes

El centro de comunicaciones interno a la CIAA posee subrutinas que le permiten pasar información interna al formato establecido en los mensajes y viceversa. Además, dispone de subrutinas que permiten obtener información más detallada sobre el mensaje recibido en el evento de recepción.

### Procesamiento de camino

#### Descripción de protocolo de mensajes entre CIAA y OpenMV

Para la comunicación del procesamiento del camino se envían los mensajes de información con el siguiente formato:

| Número de Byte | Bits  | Función                           | Comentarios  |
|----------------|-------|-----------------------------------|--|
| 1              | [0-7] | Medición del error al camino.     | Número en formato entero signado que indica cuantos píxeles se aparta el centro de la imagen al centro del camino a tomar. |
| 2              | [0-4] | Número del <i>tag</i> encontrado. | Número de 0 a 31 propio del <i>tag</i> encontrado. 0 en caso de que no haya <i>tag</i> .                                   |
|                | 5     | Tag encontrado.                   | Indica si se encontró un <i>tag</i> .  |
|                | 6     | <i>Fork o merge</i> pasado.       | <i>Flag</i> que indica si se pasó una bifurcación o unión.   |
|                | 7     | Error.                            | Este bit está en 1 si no se encuentra camino.  |
| 3              | [0-7] | -                                 | Este byte no envía información.  |
| 4              | [0-7] | -                                 | Este byte no envía información   |

Tabla 10-6 Formato mensajes OpenMV

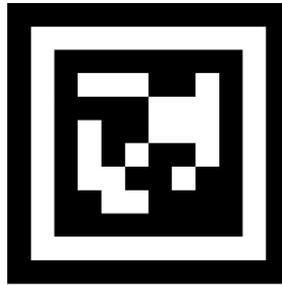
Se decidió enviar 4 bytes de información debido a la configuración de interrupciones del periférico de UART en la CIAA. De esta manera se podía hacer una interrupción cada vez que llegaban los mensajes, y permite enviar más información en caso de decidir enviar otras variables.

#### Método de detección de *tags* y camino

En cuanto a los *tags*, la placa OpenMV tiene librerías para la lectura de AprilTags, que son unos *tags* similares en apariencia a códigos QR, pero de fácil reconocimiento por cámaras. Esta característica hace que la detección sea más robusta a expensas de menor cantidad de información contenida en la imagen (los *tags* utilizados solo pueden representar 36 valores con figuras de 8x8).

Dentro de los AprilTags hay distintas familias con distintas características, y dentro de las que estaban contempladas para su uso en las librerías del OpenMV se escogió la más robusta: 36H11 (la robustez está asociada al parámetro h de la familia). Se escogió el *tag* número 3 para identificar estaciones. El algoritmo de detección utilizado por la librería consume una cantidad de memoria considerable, por lo que está solo

permitido utilizarlo con resoluciones menores a 120x160 pix (QQVGA). Esta restricción fijó la resolución utilizada de la cámara.



TAG36H11 - 3

*Figura 10-34 Tag utilizado para identificar estaciones*

En cuanto al camino, se optó por marcar el piso con dos colores luego de contemplar distintas opciones. Para la detección del camino se utilizó la descomposición de la imagen en el espacio de colores LAB, ya que permite fácilmente separar en colores la imagen y que el OpenMV tiene librerías incorporadas para ello. Luego, se establecieron empíricamente rangos de valores del espacio LAB que clasificaban correctamente los colores del camino (verde y azul) y se propuso un algoritmo que entregue dos imágenes binarizadas con estos rangos. Aquellas dos imágenes representan que píxeles son de cada color, una para el color verde y otra para el azul.

Cabe aclarar que se escogieron el color verde y azul porque no son usuales para colores del piso y se distinguen fácilmente, pero el código es flexible y se puede adaptar a otros colores. Para la detección del camino se usa un algoritmo que utiliza las dos imágenes binarizadas que recorre por filas y busca si hay píxeles verdes que tengan un píxel azul en a su derecha. Con este algoritmo se obtiene para una fila de píxeles donde hay un camino. El utilizar dos colores permite una detección más robusta, ya que frente a reflejos o imperfecciones del piso que tengan un color deseado, deberían tener el otro color en el píxel vecino para ser tomados como camino.

Una vez clasificado ya los píxeles de camino, se toma el error como la distancia en píxeles desde el centro de la línea de camino hasta el centro de la imagen. En el caso de tener dos líneas por una bifurcación, se toma la distancia al camino dado, tal como se explica en la Figura 10-29.

Además, por cómo fue ubicado en el chasis (sobre el caño superior de la parte frontal con un ángulo de 35° respecto al plano horizontal) se tiene un rango de visión de 45 cm para nuestro algoritmo, es decir, un apartamiento máximo de 22,5 cm para cada lado. Es importante notar que nuestro algoritmo analiza el camino un poco más delante que por donde está recorriendo el AGV, por lo que al utilizar otro algoritmo esta distancia podría variar. Otro detalle importante del código es que al perder la referencia del camino empieza a acumular error para el lado en el que estaba antes la línea, y por software tienen que pasar dos segundos sin referencia para que el vehículo se frene. Esto permite seguir caminos que tengan un desvío mayor al que se puede ver desde el procesamiento de la cámara.

### Control de movimiento

#### Método de medición de los *encoders*

Para la medición de velocidad por medio de los *encoders* se utilizó un periférico de temporizadores propio del microcontrolador. Se configuró para que haga de contador de tiempo entre cada flanco ascendente de señal del *encoder*.

Como se necesitan mediciones cada 50ms, se programó una lógica que devuelve que la velocidad es nula en caso de que no haya dos flancos en ese período de tiempo. Si hubo un solo flanco se envía ese valor, y si hubo varios flancos, se toma como mejor estimador la mediana de las mediciones debido a las características del ruido: Se obtienen velocidades muy altas por errores de flancos muy cercanos por falla del sensor. Al usar un filtro de mediana, estas mediciones son evitadas y se obtiene una medición certera de la velocidad.

#### Filtros FIR en la medición de la velocidad angular

La velocidad angular de los motores es crítica para poder realizar un control apropiado. El hardware utilizado para el proceso es sensible al ruido y puede transmitir mediciones erróneas, por esto se colocó una etapa de filtro adicional. Se implemento un filtro FIR para la medición de los *encoders*, luego del resultado que devuelve el periférico del *timer*. Para este se utilizó una librería incluida en el firmware del microcontrolador. Dado que este busca agregar una capa más de confiabilidad, pero impacta en el tiempo de respuesta de la medición, se puede configurar a través de la interfaz de diagnóstico si se quiere utilizarlo o no.

#### Detalles del PID

La implementación del controlador PID se basa en la teoría de control discreto. El algoritmo es provisto por una librería abierta [11]. Esta consiste meramente en una clase PID, que recibe como parámetros del constructor las ganancias de la componente integradora, la derivativa y la lineal. Además, recibe como parámetro un puntero a las variables de input, setpoint y output del sistema. Finalmente, cuando se ejecuta la función “compute” de la clase, esta almacena en la variable output la salida del controlador. La clase tiene funcionalidades adicionales para reiniciar la componente integradora o simplemente anular el sistema. Estas hacen que el bloque sea versátil y ayudan a resolver los problemas de no linealidad que puede llegar a presentar la planta.

#### Control PWM

Para la señal de PWM se utilizó el periférico de “State Configurable Timer”, común en los microcontroladores LPC. Este periférico maneja un *timer* interno que le permite facilitar una serie de funcionalidades. Una de las funcionalidades es una salida PWM, la cual se le puede configurar la precisión y la frecuencia a través de un registro. Luego, el *duty cycle* de la señal queda definido también por un registro al que se puede acceder a través de uno de los servicios que brinda el firmware del sistema.

La frecuencia que se utilizó para la señal del PWM es de 20 KHz. El valor de esta no es arbitrario, se tuvo en cuenta el ruido auditivo que se genera a partir de la frecuencia que se usa para controlar los motores, las limitaciones del controlador y el ruido eléctrico inducido en la medición de los *encoders*.

#### Estimación de distancia recorrida

El control de movimiento también estima la distancia recorrida, que finalmente se muestra en la aplicación de usuario. Esto consiste simplemente en integrar la velocidad lineal, que se calcula a partir de la velocidad

angular de las ruedas. Entonces en cada iteración de la tarea principal del control de movimiento, se suma la distancia recorrida en el último período a la variable de distancia estimada. Luego, cuando se alcanza un nuevo nodo de la trayectoria, esta variable es igualada a cero y el proceso de integración comienza de vuelta.

### *Control de trayectoria*

Con el flujograma y la máquina de estados propias de este módulo descritas anteriormente este módulo queda detallado considerablemente. Igualmente es necesario destacar que este bloque tiene una tarea periódica que envía al OpenMV el estado que deberá tomar. Además, el periférico de UART fue configurado para activar una interrupción al tener 4 bytes y se desarrolló una subrutina para decodificar los mensajes.

### *BMS*

Para el equipo, el *Battery Management System* no es un módulo en sí mismo, sino que contiene el código necesario para que el Sistema de Seguridad realice mediciones de la tensión de la batería. Estas mediciones se utilizan para comunicar el estado al usuario y detener la operación del vehículo si el nivel de carga de la batería disminuye a niveles peligrosos.

La medición se realiza con un ADC de 10 bit de resolución y se le aplica un filtro promediador de orden 30 para estabilizar las mediciones debido al ruido que ingresa por la variación de corriente de los motores. Por el momento, las mediciones se realizan de forma bloqueante.

### *Sistema de seguridad*

El sistema de seguridad se ejecuta de forma periódica desde una tarea del RTOS con prioridad más alta.

Dentro de esta tarea se invocan en orden las subrutinas para realizar las siguientes tareas:

1. Alimentar al *Watchdog*: está configurado para ser alimentado cada dos segundos antes de provocar un reinicio del sistema.
2. Ejecución del módulo BMS: se realiza una nueva medición de la tensión de la batería y se evalúa el nivel de carga.
3. Botón de emergencia: si se detecta que está presionado, se activa un evento global para que los distintos módulos de software tomen acciones para reducir el peligro. Además, el botón de seguridad está conectado por hardware a la habilitación de los controladores de los motores, por lo que el vehículo se detiene de forma inmediata.

### *Tablero de operaciones*

El tablero de operaciones consistió principalmente en la interpretación de las señales recibidas por medio de los botones y de las señales enviadas a las distintas luces indicadoras, ya sean las de los botones o las de señalización.

Para la interpretación de los botones se contó con subrutinas no bloqueantes en las cuales se utilizaron contadores para verificar el tiempo durante el cual se presionó cada botón. De esta forma, y estableciendo un valor determinado de tiempo para una pulsación corta o larga, al decrementar el contador se verifica que se haya llegado al tiempo necesario para ser considerado una pulsación exitosa. Aquellas pulsaciones que

no cumplen con el tiempo establecido son descartadas, reiniciando el contador. Para evitar los efectos de rebote de las llaves, tanto la pulsación corta como la larga fueron tratadas como pulsaciones largas, con la salvedad de que la pulsación corta tiene un menor tiempo requerido para ser una pulsación exitosa, la cual de todos modos en la práctica se percibe como una pulsación corta. Esto permite considerar únicamente pulsaciones sostenidas y con un “anti-rebote” desarrollado por software, ya que fluctuaciones de la entrada reiniciarán el contador hasta que no se produzcan más variaciones y el contador se decrementará de forma correcta hasta detectar que se alcanzó el valor que hace verdadera la condición de pulsado correcto. El código está realizado de forma tal que permite agregar a futuro funciones adicionales utilizando dos o más pulsaciones largas o cortas consecutivas. Estas señales se envían al centro de control, que será quien ejecute la orden necesaria en función del botón pulsado.

En lo que respecta a las luces de los botones y las de señalización, se utilizó un contador que mantiene la luz prendida por el tiempo necesario, variando el mismo en función de la orden recibida.

### *Centro de control*

#### *Interacción con los otros módulos*

Como fue explicado en secciones anteriores, el centro de control dirige la operación general del AGV. Para lograr esto, tiene una tarea principal que puede ser activada por una serie de eventos (ver Tabla 10-2). Luego, al ejecutarse la tarea, se analiza el evento y la máquina de estados actúa según corresponda. Llegado el caso, esta emite los eventos correspondientes para que los demás módulos también sean activados y continúe la operación del vehículo.

Más allá de los eventos, el centro de control mantiene un flujo de comunicación entre el centro de comunicaciones y el control de trayectoria, para la manipular la información de las misiones. Este canal de comunicación consiste en punteros a variables, que detallan la información de la misión y subsecuentemente cada uno de los bloques de esta. Cabe aclarar, que el centro de control maneja los bloques de misión y el control de trayectoria maneja únicamente bloques que componen a la misma. A su vez, el centro de comunicaciones maneja la información en forma de paquetes.

#### *Descripción detallada de la estructura de misiones*

La estructura de misión utilizada es ilustrada en la Figura 10-35:

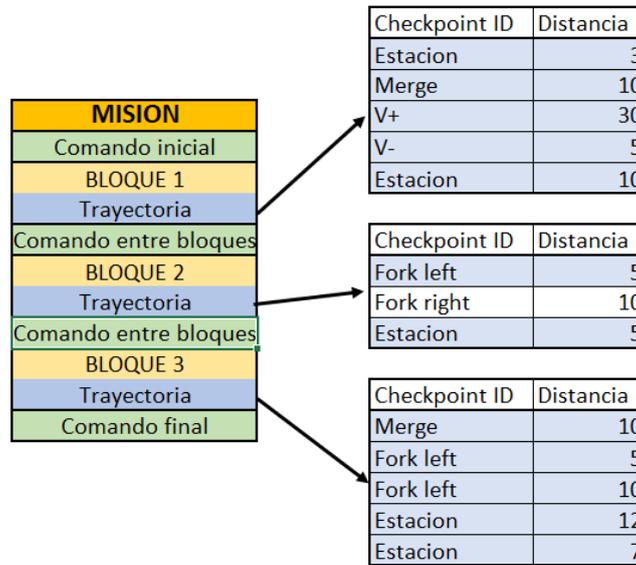


Figura 10-35 Ejemplo de estructura de las misiones

Una misión está compuesta por una lista de: comandos entre bloques seguidos de bloques de misión. Una misión siempre debe comenzar con un comando y terminar con otro. Los bloques a su vez están tienen una lista de *checkpoints* y la distancia entre cada uno de ellos.

Se llaman *checkpoints* a todos los objetivos en el camino, que son:

- *Fork Left*: Al tener una bifurcación, se toma el camino izquierdo.
- *Fork Right*: Al tener una bifurcación, se toma el camino derecho.
- *Merge*: Cuando se toma el sentido de la unión en una bifurcación.
- Estación: Tag de estación en la cercanía al camino.

Por último, los comandos entre bloques pueden ser los siguientes:

- *Houston*: Se espera un mensaje de continuación del centro de comandos para continuar.
- *Button*: Se espera que se presione el botón verde para continuar.
- *None*: No hace falta ningún comando para continuar.

*Aplicación de usuario*

Consideraciones generales

La aplicación de usuario fue desarrollada con el fin de demostrar que el manejo del AGV puede ser manejado simplemente por una interfaz amigable al usuario. Se escogió desarrollar en Python ya que es portable en cuanto a sistemas operativos y su lenguaje de alto nivel permite un rápido desarrollo.

Al usar Python hay librerías que facilitan el desarrollo de interfaces con el usuario. Se decidió utilizar la librería PySide por ser la oficial interfaz de Qt de Python, permitiendo hasta exportar la interfaz para sistemas embebidos escrita en C++. Además, está disponible un programa para desarrollar la estructura de la interfaz gráficamente, Qt Designer, lo cual simplifica considerablemente el diseño.

Se utilizó la librería Matplotlib para dibujar el mapa y las posiciones de los AGVs en el mismo, ya que tenía un modo de compatibilidad con PySide. Además, cuenta con una barra de herramientas útiles para la navegación del mapa, como por ejemplo herramientas de *zoom* y movimiento. También se utiliza la librería de *paho-mqtt* para los mensajes de MQTT.

Para un lugar en particular, el mapa debe ser escrito en el formato de un grafo dirigidos con peso equivalente al largo del camino entre cada nodo (cada nodo representa un *checkpoint*). Luego, el funcionamiento de la interfaz es el mismo.

Explicación de uso

La interfaz del usuario tiene como página principal la siguiente captura:

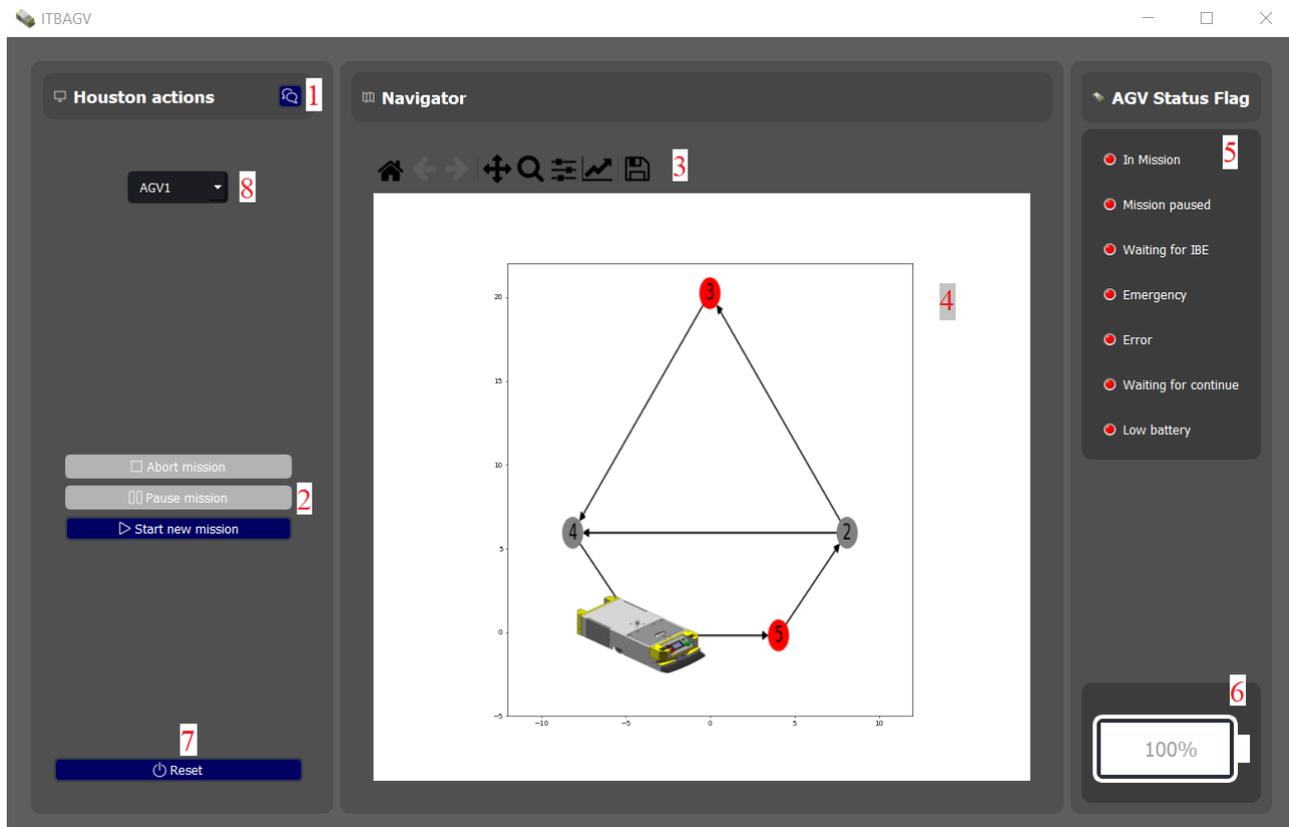


Figura 10-36 Captura de página principal de interfaz al usuario

A continuación, se detallan los puntos numerados:

1. El botón con la ilustración de chat permite ir a la pestaña de log, en la cual se muestran todas las acciones realizadas en el sistema.
2. Estos tres botones son los que permiten el manejo de las misiones. Con *start new mission* se pasa a la pestaña de misión en la cual se detalla la misión a enviar. El botón de *abort* permite abortar cuando se encuentra en una misión el AGV seleccionado. El botón de pausa permite pausar la misión, y al hacerlo se transforma en un botón de continuar, y también permite continuar misiones que esperan orden desde la aplicación.
3. Estos íconos son la barra de herramientas de navegación del dibujo. Permiten volver a la vista original, a vistas previas, desplazarse por el mapa y hacer *zoom* entre otras cosas.
4. Sobre esta figura se dibuja el grafo que representa el mapa y los AGVs.
5. En este panel se muestra información relevante del estado del vehículo seleccionado como leds (está verde cuando se cumple la condición):
  - a. *In mission*: Indica si está en una misión el AGV.

- b. *Mission paused*: Indica si está en pausa.
  - c. *Waiting for IBE*: Muestra si el AGV se encuentra esperando por un comando entre bloques para continuar.
  - d. *Emergency*: Se enciende en caso de que se haya presionado el botón de emergencia.
  - e. *Error*: Indica si hubo un error comunicado. En ese caso se debe reiniciar el sistema para el correcto funcionamiento.
  - f. *Waiting for continue*: En caso de que se espere un *continue* desde la aplicación, este led se enciende.
  - g. *Low battery*: Indica cuando el nivel de batería cayó debajo del 30%.
6. Este dibujo indica el nivel de batería del vehículo estimado a partir de la tensión medida.
7. Este botón permite reiniciar todo el sistema.

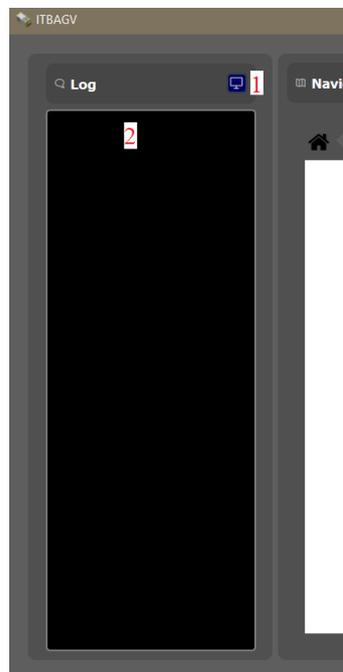


Figura 10-37 Pestaña de Log

Con este elemento se escoge un AGV para el envío de misión y la visualización de su estado. En la pestaña de *log* se muestran los mensajes recibidos y las acciones realizadas desde la interfaz en el espacio 2. Con el botón 1 se vuelve a la pestaña principal.

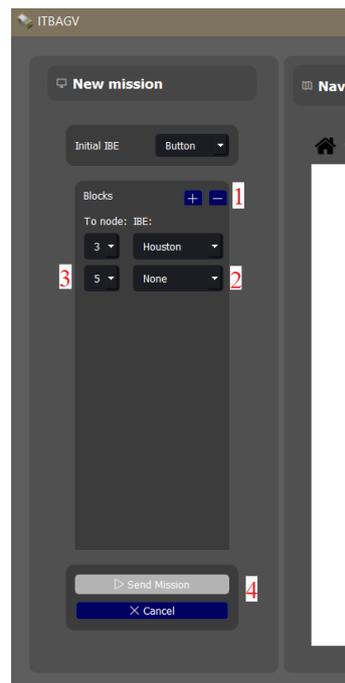


Figura 10-38 Pestaña de detalles de misión

Al elegir una nueva misión se entra en la pestaña de detalles de misión. Primero se debe decidir el primer evento para que comience la misión. Estos eventos están explicados en la sección del centro de control. Luego con los botones en 1 se pueden agregar bloques de misión. Cada bloque de misión cuenta con el nodo objetivo al cual se mueve en ese bloque (3), y luego el comando que espera para finalizarlo (2). Por último, en 4 se encuentra el botón para enviar la misión o cancelar.

#### 10.2.4. Plan de prueba de módulos y de depuración de Software

##### *Centro de control*

Para el caso del centro de control, las pruebas deben verificar que las distintas transiciones de estado se realicen de forma exitosa. Luego, el administrador de eventos debe ser capaz de encolar los eventos que ocurren y finalmente asignarlos a los servicios que correspondan. Luego, se debe verificar que la actualización de las variables se realice de forma periódica. Una vez probados los demás módulos, este módulo se verifica realizando al menos diez misiones con distintas características.

##### *Control de trayectoria*

Este módulo se prueba asignando una misión fija en el código y emulando las lecturas del OpenMV. Para emular las mediciones se desarrolló un código que permitía indicar fácilmente que se observa desde la cámara. Con ello se prueba que para cada tipo de *checkpoint* se avanza en la misión al recibir de la cámara el mensaje apropiado, y se activan los eventos adecuados en la CIAA.

### *Control de movimiento*

Este módulo cumple con una función principalmente matemática. El punto crítico de este es el tiempo que tarde en realizar el cálculo para el control de las velocidades. Teniendo esto en cuenta, la prueba de este módulo consiste en verificar que la transferencia de este cumpla con los requerimientos de control. El criterio de aceptación de la prueba es que los tiempos de proceso y la precisión de control caigan dentro del rango aceptable. También se debe verificar que la salida de control sea capaz de controlar la velocidad de los motores. Esto implica que la velocidad medida se debe ajustar al *setpoint* establecido, con un rango de error por debajo del 10%, luego de un tiempo de establecimiento menor a 1,8 seg (**PER-04**). Esto se corrobora a través de la interfaz de diagnóstico, donde se observa la velocidad medida y el *setpoint* en tiempo real, para cada uno de los motores.

### *Sistema de seguridad*

El sistema de seguridad implementado debe ser probado en sus dos aspectos fundamentales. En primer lugar, se debe asegurar que el *Watchdog* esté activo y que reinicie el vehículo, si el sistema de seguridad deja de alimentarlo. Para probar esto es posible agregar al código un ciclo bloqueante infinito, del cual nunca salga y por lo tanto nunca se ejecuta la rutina del sistema de seguridad. Se deberá comprobar que el sistema se reinicia.

Por otro lado, se debe comprobar que, al presionar el botón de emergencia del AGV, el vehículo se detenga y que todos los módulos pasen a su estado correspondiente a la situación de emergencia.

### *Tablero de Operaciones*

Para corroborar el correcto funcionamiento de este módulo se realizó, por un lado, un estudio de la respuesta del sistema ante distintos tiempos de presión de los botones y diferentes repeticiones consecutivas utilizando un cronómetro. De esta manera se verificó que la respuesta ante una orden ingresada por medio de un botón se cumpla únicamente cuando se mantuvo presionado el botón por un tiempo igual o mayor al previamente configurado. De esta forma se verifica el funcionamiento tanto de la pulsación corta como la pulsación larga.

En lo que respecta a las luces, tanto las de los botones como las de señalización, se verificó utilizando nuevamente un cronómetro que estas se mantengan encendidas o apagadas durante el tiempo configurado en función del estado de la unidad.

### *Battery Management system*

En primer lugar, se debe corroborar que las mediciones de la tensión de la batería son correctas. Para esto, se debe conectar la alimentación del AGV a una fuente de tensión regulable. En paralelo, una punta de osciloscopio se utilizará para corroborar la validez del BMS. Se debe variar la tensión de la fuente desde el rango desde 12,73 V hasta 11,51 V, que corresponde al rango seguro de operación de la batería.

Se debe verificar que la medición que indica el AGV en la interfaz de comando sea acorde a la siguiente tabla:

| 10%     | 20%     | 30%     | 40%     | 50%     | 60%     | 70%     | 80%     | 90%     | 100%    |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 11,51 V | 11,66 V | 11,81 V | 11,96 V | 12,10 V | 12,24 V | 12,37 V | 12,50 V | 12,62 V | 12,73 V |

Tabla 10-7 Porcentajes de carga de batería según su tensión

*Aplicación de usuario*

La aplicación de usuario básicamente muestra las variables internas del AGV y acciona sobre misiones, empezándolas, pausándolas, etc. Para verificar que su funcionamiento es adecuado de una manera modular, se desarrolló un emulador de AGV, el cual puede enviar todos los mensajes del protocolo y mostrar los mensajes recibidos. También puede ajustar los parámetros para mensajes que requieren de ello, como por ejemplo el de estado. Por la variedad de mensajes, se decidió que la forma más amigable de usarlo sería con una interfaz gráfica, por lo que se escribió su código.

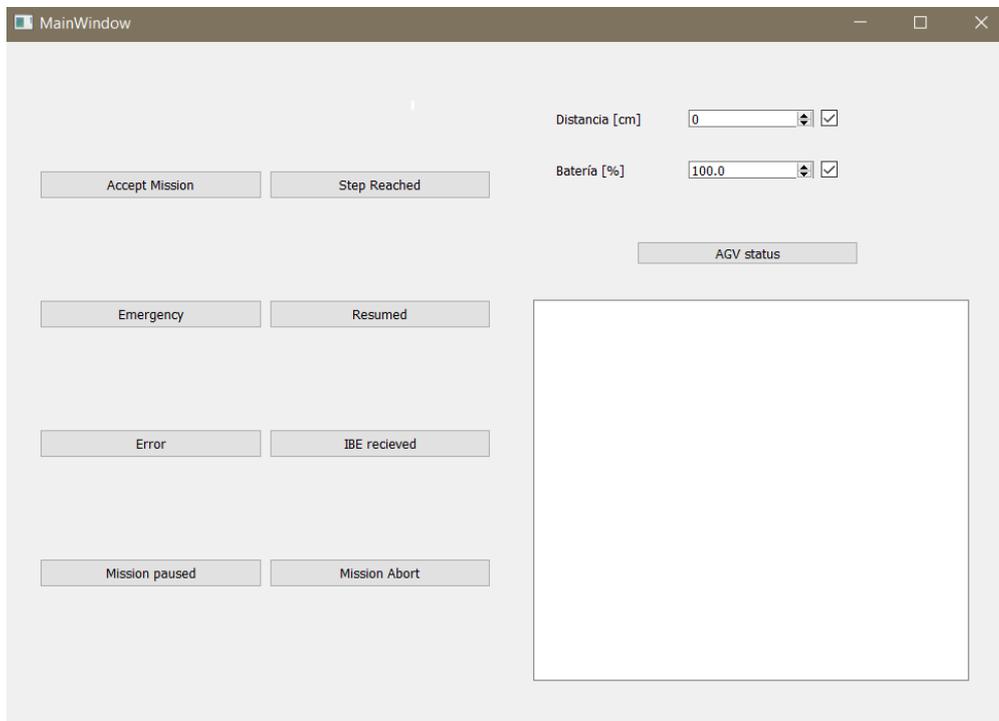


Figura 10-39 Emulador de AGV para pruebas de aplicación de control

Se prueban luego los comandos de misión, que el estado se represente correctamente, los de emergencia y por último el de error. También se verifica que al enviar paquetes que no corresponden la aplicación de control entra en un estado de error y es necesario apretar el botón de reinicio.

*Procesamiento de camino*

Para probar el funcionamiento de este código se utilizaron dos herramientas: impresiones en una terminal de comunicación y la impresión de la imagen procesada en tiempo real a través interfaz de programación. Con la primera se comprueba que el error se imprima correctamente, que la lógica de bifurcaciones funcione y que indique adecuadamente los *tags* del camino. Con la segunda herramienta se comprueba el

funcionamiento del algoritmo de indicación del camino y también que sea acorde a la medición de error enviada.

#### *Centro de comunicaciones*

El centro de comunicaciones es probado modularmente y luego en su conjunto. Primero, se desarrolla un programa de prueba para enviar los distintos tipos de paquetes predefinidos desde la aplicación, y se verifica su correcto envío a través de un simple cliente suscripto al tópico de MQTT. En segundo lugar, se prueba el programa en la placa WeMos, se comprueba que lleguen los mensajes enviados por el protocolo mencionado y, a través de impresiones en consola, se verifica que se envían los mensajes adecuados.

Por último, se verifica que el código interno a la CIAA genere el evento correspondiente, junto con la traducción del mensaje a la estructura interna. También se comprueba que los mensajes enviados sigan el protocolo especificado anteriormente.

## 11. Construcción de prototipo

### 11.1. Consideraciones del prototipo

En esta sección se explican ciertas consideraciones que se tomaron a la hora de implementar el proyecto planteado y los desvíos necesarios para poder llevarlo a cabo.

#### 11.1.1. Llave termomagnética

Para el prototipo se utilizó una llave termomagnética de tipo C16, perteneciente a uno de los integrantes del equipo. Si bien esta se activa ante picos de corriente superiores a 16 A, se considera que la implementación en el prototipo es adecuada ya que ante un cortocircuito protege la batería y el resto de los circuitos del vehículo.

#### 11.1.2. Batería

Afortunadamente, el equipo consiguió prestada una batería por parte de una empresa que generosamente la suministró por la duración del proyecto, por lo que se ahorró en la compra de la batería elegida previamente. Esta batería es de la marca Varta modelo 6-QW-60(580)-L y posee una capacidad de 60Ah. Cabe aclarar que este valor es considerablemente mayor a lo calculado e implica una batería más grande y pesada de lo estrictamente necesario.

#### 11.1.3. Motores

Es necesario mencionar que, aunque los motores definidos en la sección 10.1.3 son los que corresponden utilizar para una solución comercial y fabricada en serie, debido a su elevado costo y tiempo de envío se buscaron alternativas locales de prestaciones similares que impliquen un menor gasto al equipo.

Se buscó en diversos lugares por motores, considerando el precio como principal factor dado el contexto del proyecto. Finalmente, el equipo decidió utilizar los motores provenientes de un gato eléctrico para autos que, según su especificación, soportan hasta 10 A 12 V o 120W. El mismo se puede ver en la Figura 11-1.



Figura 11-1: Gato eléctrico para auto

La elección de este tipo de producto se debió a varias razones:

- Por un lado, al ser un producto proveniente de China que se importa en grandes cantidades al país, su costo de adquisición es bajo.
- La potencia es sustancialmente mayor a la necesaria, por lo que incluso considerando el 50% la potencia indicada en el manual del producto debido a ser de un proveedor desconocido y asumiendo una eficiencia del 60% del conjunto motor-reducción, los motores serán suficientes para cumplir con las especificaciones.
- El producto utiliza motores DC, por lo que coinciden con la tecnología planteada en el diseño.
- La caja de reducción de engranajes ya viene acoplada al motor, con el eje de salida ya conectado, y el producto está diseñado para soportar cargas grandes (1 tonelada según lo especificado en el manual), por lo que nos proporcionó confianza que el eje y la caja reductora soportarían sin problemas los esfuerzos provocados por la tracción del AGV.
- El producto es apto para ser utilizado con baterías de auto de 12V, por lo que es compatible con nuestro diseño.

Por lo tanto, esta alternativa solucionó importantes desafíos mecánicos en un único producto de bajo costo, permitiendo al equipo enfocarse en los desafíos electrónicos y de control del vehículo.

Una de las principales desventajas de haber utilizado una solución mecánica ya diseñada fue que se desconocía de antemano si la velocidad de rotación del eje de salida iba a ser suficiente para las especificaciones planteadas. Aunque la potencia de los motores fuera suficiente, podía ocurrir que, con la carga máxima, el AGV no alcance la velocidad necesaria debido a que el motor y la reducción ya estaban seleccionados. Aunque no es lo ideal, este problema se puede solucionar aumentando la tensión de alimentación de los motores a más de 12V, de forma tal que la bobina del motor se energiza a mayor velocidad, lo que hace girar el rotor con mayor torque. Sin embargo, esta solución requiere medir continuamente la corriente del motor para procurar no superar la corriente máxima y arriesgar quemar el bobinado.

Para evaluar esto, se adquirió una unidad de este producto y se midió que la velocidad del eje de salida era de 52.8 RPM para el eje sin carga. Esto es un 53,5% mayor a la rotación de las ruedas a la velocidad máxima del vehículo. Aunque esta velocidad angular disminuye a medida que se agrega carga sobre el eje, se estimó que, debido a la importante reducción de la caja, los motores podrían alcanzar la velocidad necesaria con carga. El consumo de los motores en estas condiciones fue de 0,35 A.

Otro aspecto importante de los motores utilizados es la reducción de velocidades. Se puede ver una imagen de este componente del ensamblaje motor en la Figura 10-14. Luego, se midió la reducción total de la caja contando los dientes de cada etapa. Los motores adquiridos cuentan con una reducción de 2 etapas de las siguientes características:

| Reducción Etapa 1                      | Reducción Etapa 2                       | Reducción Total  |
|--|---|--|
| $R_1 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{7}{68}$ | $R_2 = \frac{d_3}{d_4} = \frac{11}{68}$ | $R_T = R_1 \cdot R_2 = \frac{77}{4624} \equiv 60.06$ veces |

Tabla 10-2 Reducción de los motores.



Figura 10-15 Reducción del motor.

#### 11.1.4. Controladores de motor

Como se mencionó anteriormente, para los controladores de motores se eligieron los integrados LM298. Se consiguen plaquetas comerciales que ya cuentan con todos los componentes necesarios para utilizar estos integrados para el control de motores, incluidos las borneras para conectar la alimentación y motores, regulador de 5V para la lógica del integrado, disipador, entre otros. La plaqueta utilizada se puede ver en la Figura 11-2.



Figura 11-2 Controlador de motor

### 11.2. Diseño de los circuitos

En las siguientes subsecciones se presenta la lógica detrás de cada diseño de circuito. Los esquemáticos de los módulos que no implicaron un diseño por parte del equipo, se pueden ver en el Anexo 15.1.

#### 11.2.1. Sensor de velocidad

Un aspecto fundamental para lograr medir la velocidad de los motores es asegurar que la señal que lee el microcontrolador es apropiada. Para corroborar esto, se utilizó un osciloscopio para poder visualizar las características de la señal que llega al microcontrolador. Se notó que la misma presentaba ruido y que no era lo suficientemente pura para que el microcontrolador lea un pulso cuando el disco avanzaba una ranura. Para solucionar esto, en primer lugar, se agregó un capacitor de 3.3 nF y 6.8 nF entre el pin de salida digital y masa. Esto permite filtrar sustancialmente el ruido eléctrico presente en esta señal. Además, se agregó un componente de tipo disparador Schmidt antes de la entrada al microcontrolador para evitar que pequeñas variaciones en la señal digital provoquen lecturas de varios pulsos. Particularmente, se utilizó un 74HC14 para lograr esto.

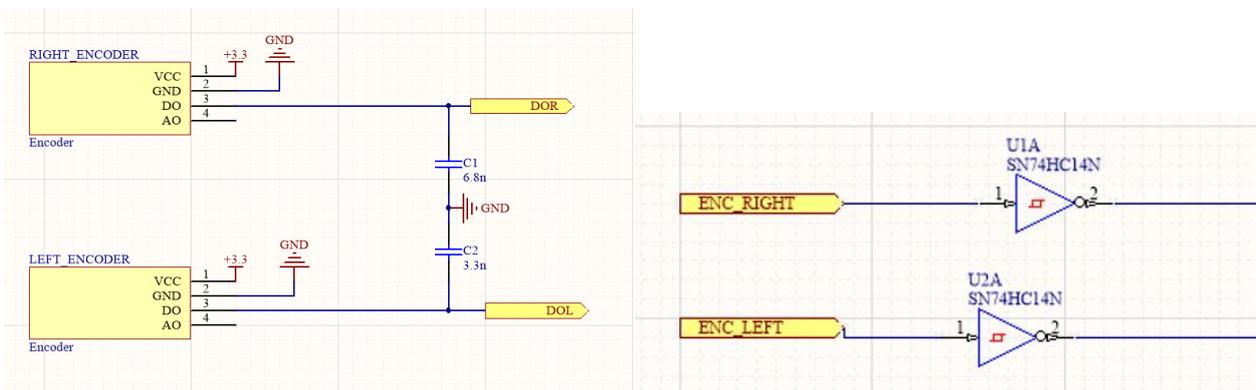


Figura 11-3: Esquemático del circuito de encoders.

### 11.2.2. Controladores de motor

Los controladores de los motores fueron comprados, por lo que ya se encuentran integrados en una placa con todos los componentes necesarios para su funcionamiento. Se agregó, sin embargo, un capacitor de 100uF en la alimentación de cada controlador, a fin de reducir las perturbaciones de ruido que genera el PWM de los motores en la batería y, en consecuencia, en el resto de los componentes.

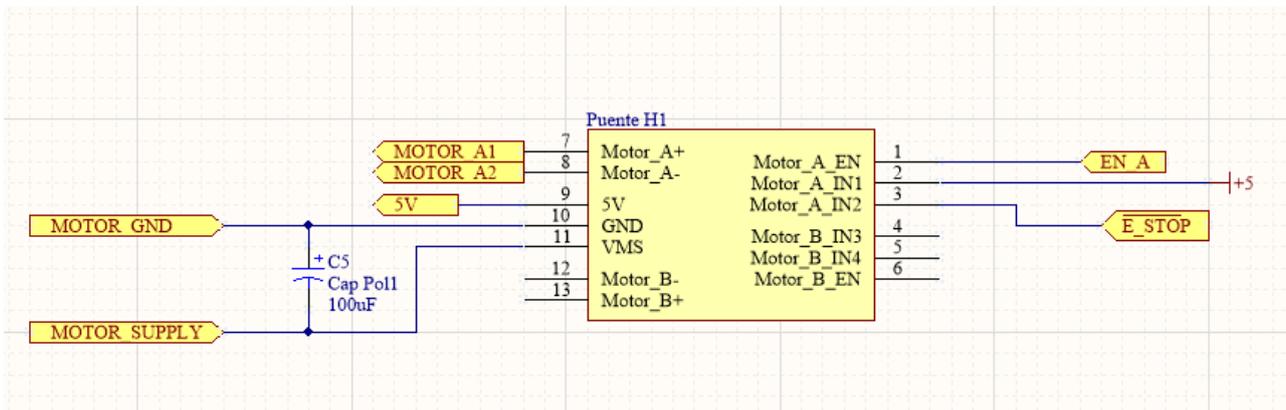


Figura 11-4 Esquemático de conexión para el controlador

### 11.2.3. Circuito de seguridad

El circuito de seguridad es una plaqueta que conecta lógicamente a los componentes de seguridad del vehículo con los frenos de las ruedas. El frenado se realiza cortocircuitando las bobinas de los motores para que el vehículo se detenga, función que se activa cuando se fijan 5V en una de las entradas del controlador de los motores. Por lo tanto, el circuito de seguridad conecta mediante una resistencia de *pull-up* a la entrada de frenos del controlador. Luego, el botón de seguridad, el *bumper* del vehículo, y cualquier otro sensor que se disponga, se ubican en serie a masa del mismo lado que el freno, por lo que, dado que los componentes mencionados tienen circuitos de tipo normal cerrado, el freno de los motores queda desactivado. Cuando algún sensor se activa, se abre el circuito a masa y la resistencia de *pull-up* fija una tensión de 5V en el freno, activándolos.

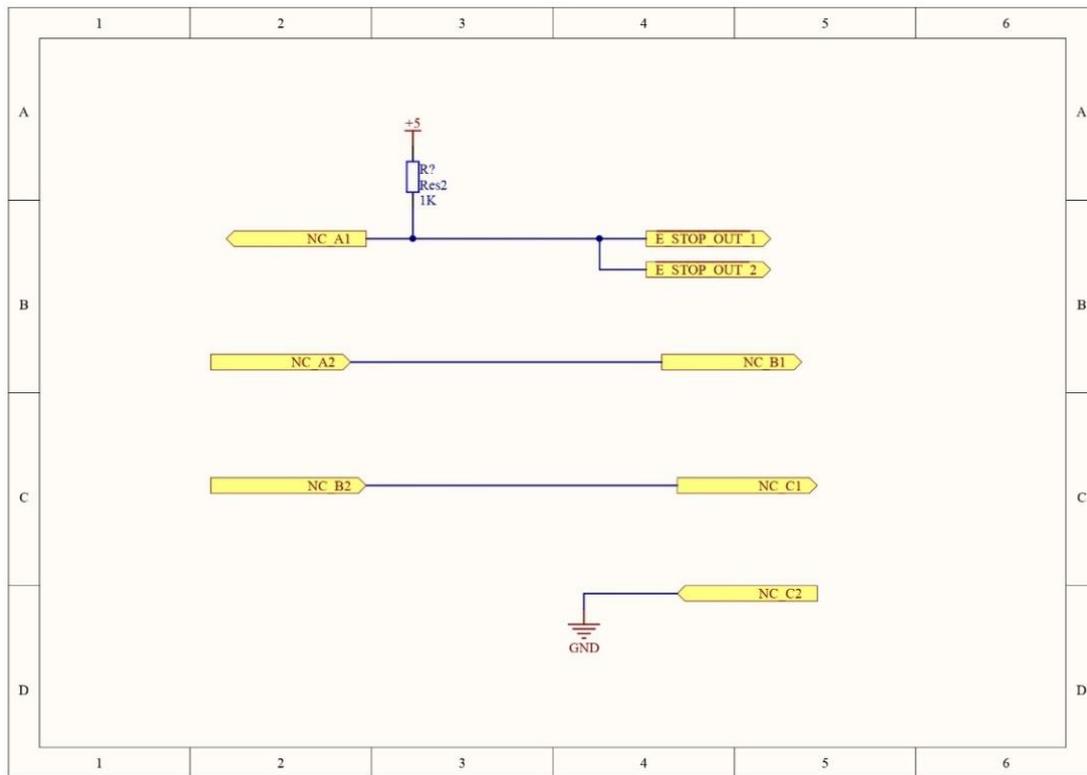


Figura 11-5 Esquemático de la placa de seguridad

#### 11.2.4. Sensor de camino y placa de comunicación

Se realizó el diseño de los circuitos para conectar la placa de la cámara OpenMV con la CIAA y la placa de desarrollo ESP-8266 con la CIAA. Estas dos conexiones consisten en adaptadores de capa física para el protocolo de comunicación. En particular, los protocolos que se usaron fueron el RS485 para la placa OpenMV y RS232 para la placa ESP-8266. En las siguientes imágenes se puede observar el esquemático de cada una de ellas.

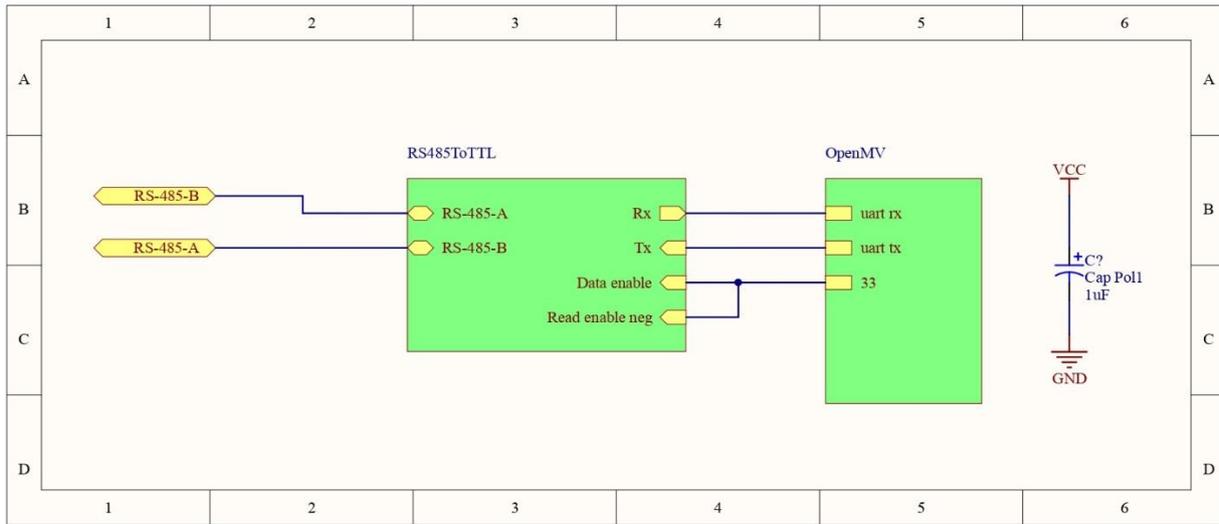


Figura 11-6 Esquemático de conexión RS485 / OpenMV

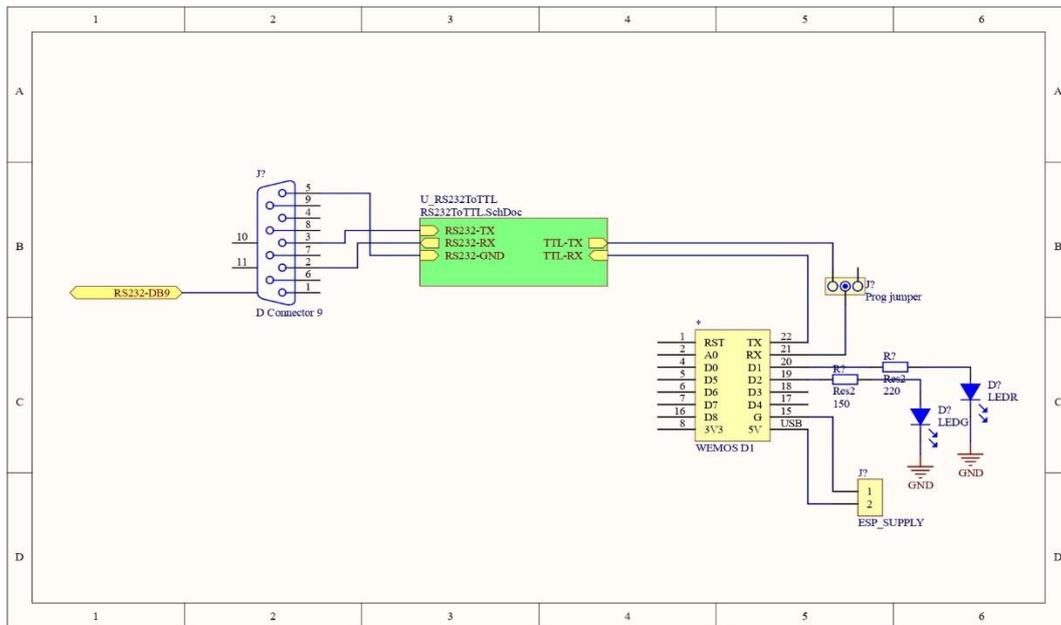


Figura 11-7 Esquemático de conexión ESP-8266 / RS232

Como se puede observar, los circuitos no son complejos. Tampoco requieren de consideraciones adicionales para fabricarlos. Los mismos no se implementaron en un PCB ya que no se justificaba la necesidad para el prototipo, por lo que se implementaron en placas multiperforadas.

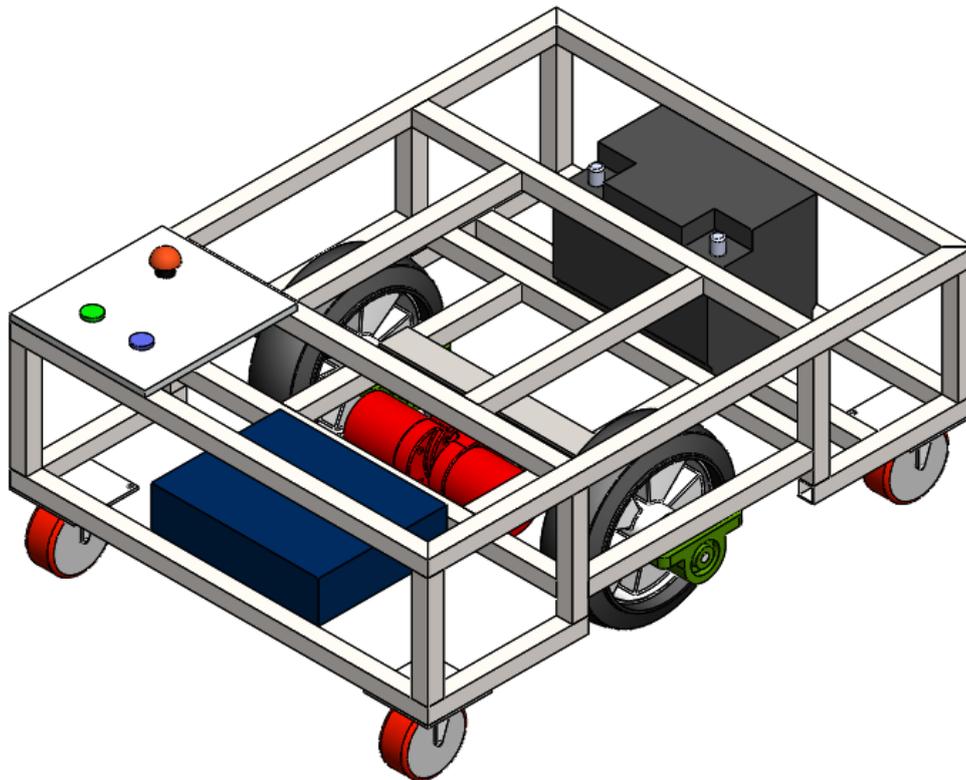
### 11.3. Diseño mecánico

Es fundamental tomar los siguientes aspectos en consideración para el diseño mecánico del AGV:

1. **Carga máxima a transportar:** esto influirá tanto en la geometría y uniones del diseño como en los materiales que se usarán. A partir del peso a transportar y el acoplamiento con el AGV (de remolque o de carga), es posible analizar los esfuerzos a los que estará sometido el vehículo al transportar la carga.
2. **Dimensiones:** es necesario mantener las dimensiones del vehículo acotadas para aumentar los ambientes donde podrá moverse.
3. **Fabricación y ensamblaje:** al hacer un diseño en computadora es fácil olvidar el procedimiento que se deberá hacer para fabricar las piezas y ensamblar el vehículo. Particularmente, se debió considerar las reducidas posibilidades de construcción disponibles en el contexto del proyecto.
4. **Peso del vehículo:** cuanto más pesada sea la estructura del vehículo, menos eficiencia tendrá el sistema.

Dado el contexto en el cual se desarrolló el proyecto, la fabricación del prototipo resultó ser particularmente desafiante. Por un lado, no se contó con las instalaciones disponibles en la universidad para la manufactura de piezas mecánicas, por lo que cualquier pieza cuya geometría requiera torneado o procesos complejos debían ser enviados a empresas especializadas, elevando sustancialmente el costo del proyecto. Por esta razón, se priorizó la simplicidad en el diseño para así poder llevar a cabo la fabricación con herramientas básicas.

El diseño se implementó con el programa CAD SolidWorks, ya que permite utilizar materiales reales y propiedades físicas para analizar las características de la estructura. Además, cuenta con la posibilidad de realizar ensamblajes de piezas, permitiendo construir el vehículo entero y visualizar el ensamblaje final. El diseño terminado se puede ver en la Figura 11-8.



*Figura 11-8 Diseño final de la estructura en CAD.*

Como se puede ver, el diseño final incluye:

- Espacio para transportar la carga encima del vehículo.
- Tablero de operaciones con botón de emergencias y de comandos.
- Tracción diferencial en el centro, con los motores del lado de abajo para optimizar el espacio.
- Gabinete delantero para proteger a los componentes electrónicos.
- Batería de plomo-ácido en la parte trasera.
- Cuatro ruedas giratorias en las cuatro esquinas para mejorar la estabilidad del vehículo y distribuir el peso en seis puntos distintos.

En las siguientes subsecciones se procede a explicar en detalle el proceso de diseño del AGV.

### 11.3.1. Estructura general

Los principales esfuerzos a los que se verá sometido el vehículo son:

- La carga que debe llevar el vehículo: queda estipulada de las especificaciones en 10 Kg.
- La batería utilizada: posee un peso de 14,2 Kg.
- Los dos motores: peso combinado de 3,8 Kg.
- Componentes: se estima que entre los módulos de control y cables se suman 2 Kg al vehículo.

Por lo tanto, el diseño del vehículo debe ser capaz de soportar 30 Kg de base, además del propio peso de la estructura. Adicionalmente, existen las restricciones sobre las dimensiones establecidas en las especificaciones y especificaciones de las interfaces que el diseño deberá satisfacer.

#### *Material de la estructura*

Se utilizaron caños de hierro estructural para la estructura del AGV por varios motivos.

En primer lugar, la resistencia de una estructura de hierro asegura que el vehículo pueda soportar el peso de los componentes y la carga sin problemas.

Adicionalmente, los caños de hierro permiten hacer las uniones entre cada pieza con cordones de soldadura. Gracias a esto se evita el peso adicional de los pernos y las dificultades de alineación entre las piezas. Hacer las uniones soldadas otorga flexibilidad y permite tolerancias mayores en el proceso de fabricación.

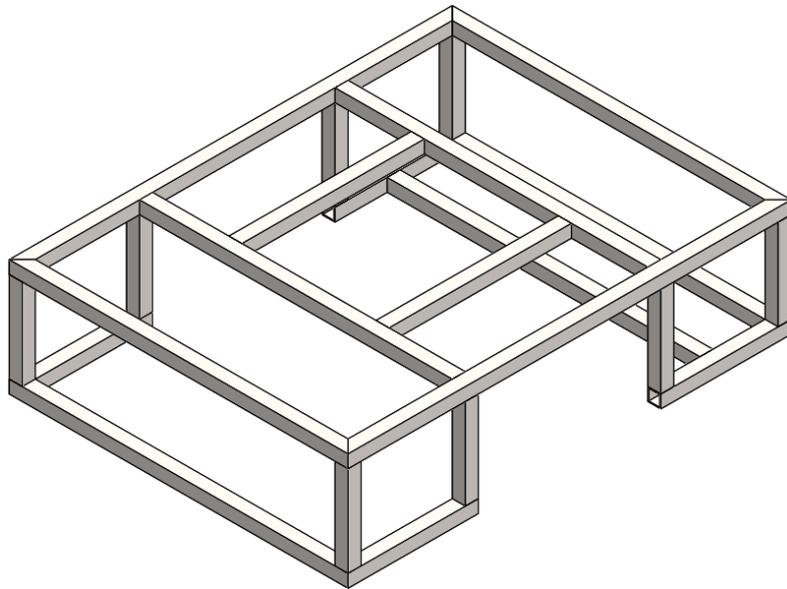
Además, el hierro, en comparación con la madera o el plástico, tiene un límite de fluencia mucho mayor que es necesario para mantener cada pieza del AGV en su lugar. Esto es de particular importancia para el módulo de tracción, donde el eje de los motores debe estar perfectamente alineado con las ruedas y los rodamientos para evitar dañarlo.

Por último, los integrantes del equipo cuentan con las instalaciones y herramientas necesarias para hacer los cortes, soldado y desbastado de la estructura, por lo que esta alternativa no implica incurrir en costos de herramientas adicionales que se podrían necesitar con otro tipo de material.

Una desventaja de utilizar únicamente hierro es que es un material pesado. Una alternativa para el producto final podría ser una combinación de partes de hierro o acero para los componentes estructurales y plástico inyectado o aluminio para otras.

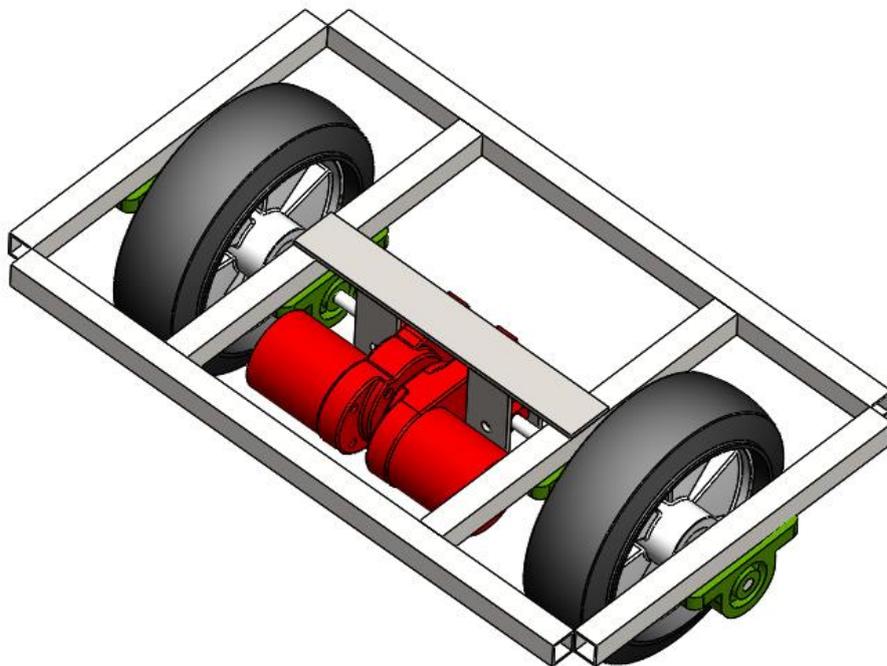
#### *Módulos*

La estructura del AGV se puede dividir en dos módulos independientes. Un módulo es la estructura externa del vehículo, que consiste en una única pieza soldada que otorga la geometría y rigidez del vehículo. Esta estructura no tiene partes móviles y se puede ver en la Figura 11-9.



*Figura 11-9 Módulo de estructura externa.*

El otro módulo es el de tracción, que contiene a los motores, el eje, las bancadas de eje y las ruedas. Se definió como un módulo separado para así poder trabajar sobre el módulo de tracción sin necesidad de tener la estructura completa, como así también hacer reparaciones. Además, al ser la parte más compleja del vehículo, es conveniente poder ensamblarlo por separado ya que facilita el armado y montaje de los componentes. En la Figura 11-10 se puede ver el módulo de tracción.

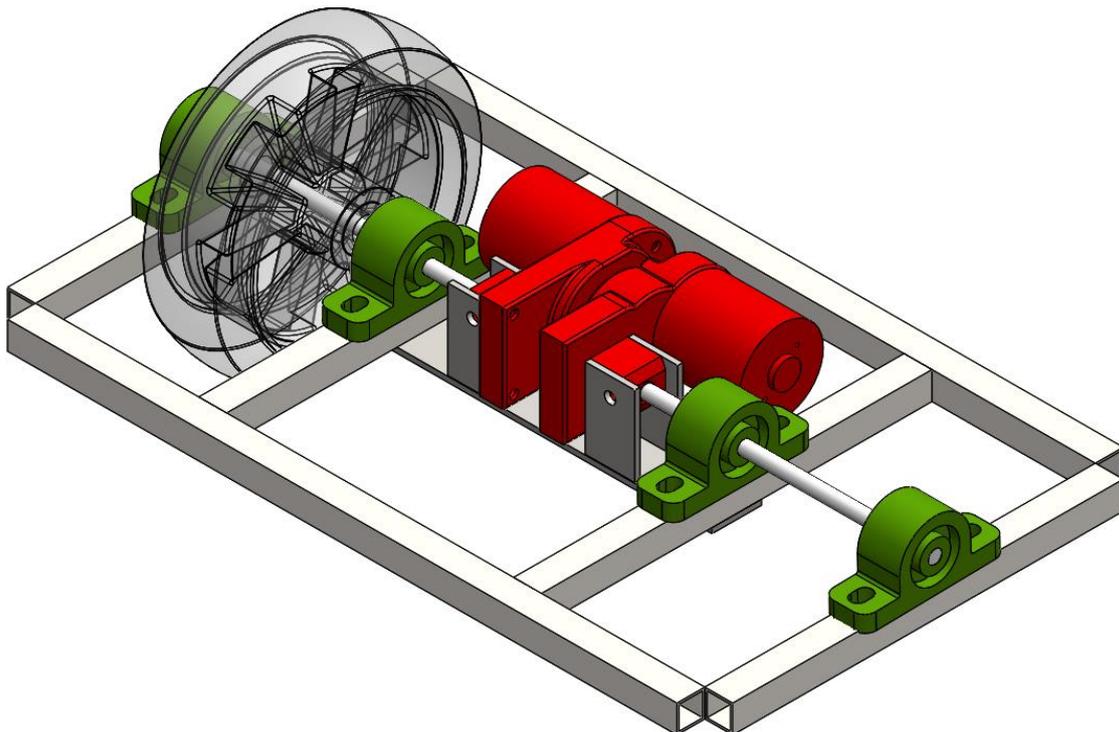


*Figura 11-10 Módulo de tracción.*

### 11.3.2. Detalles del módulo de tracción

Vale la pena analizar en detalle el módulo de tracción ya que resulta ser la parte más compleja del diseño mecánico. En la Figura 11-11 se incluye la vista inferior del módulo de tracción, con una de las ruedas eliminada para poder visualizar el módulo en mayor detalle.

Se puede ver en el centro del módulo una planchuela de hierro de 44,45 x 4,76 x 307,2 mm dispuesta de forma horizontal, con cuatro pestañas verticales con agujeros. Estas pestañas se diseñaron para sostener los motores utilizando el acople presente en el gato eléctrico de donde se extrajeron. Esta solución es ideal ya que provee un soporte rígido y seguro para los motores ya que les permite disipar calor sin estar sometidos a algún tipo de abrazadera para sostenerlos.



*Figura 11-11 Vista inferior del módulo de tracción.*

Adyacente al motor se puede ver un cilindro horizontal que representa el eje de salida de los motores. Debido a que, al apoyar el AGV en el piso, la rueda transmite una fuerza vertical sobre el eje, se pusieron dos bancadas tipo UCP201 de fundición gris con rodamientos para desviar esa fuerza hacia la estructura, y así evitar esfuerzos sobre el eje y la caja de reducción del motor. Al ubicar las bancadas completamente alineadas con el eje, este solo debe resistir esfuerzos de torsión para hacer girar la rueda, tal como fue diseñado. El peso de la carga lo resisten los rodamientos en el interior de las bancadas, que están clasificados para soportar hasta 6600 N de fuerza, o 673 Kg cada una. Se puede ver una foto de los soportes de eje UCP201 en la Figura 11-12.



Figura 11-12 Soportes de eje UCP201.

Por último, los tubos que hacen de pared exterior a las ruedas no se encuentran unidos al módulo de tracción. Esto es porque es necesario quitarlos para insertar la rueda en el eje al montarla. Estos tubos laterales se acoplan al módulo de estructura externa mediante un perno para poder quitarlos y acceder a las ruedas sin desarmar el vehículo entero. Se aclaran más detalles en la Sección 11.4.

### 11.3.3. Sensores de velocidad de los motores

Como se mencionó en la Sección 10.1.3, se utilizó para medir la velocidad *encoders* ópticos con disco ranurado. Dados los motores seleccionados, existen dos opciones para la utilización de un *encoder* de este tipo.

Por un lado, colocar el disco y el *encoder* en el eje de salida resulta lo más sencillo dado el espacio disponible y que se reducen las exigencias mecánicas debido a la menor velocidad. Sin embargo, al tener menor velocidad, se pierde sustancialmente la precisión en la medición dado que la tasa de refresco disminuye. Esto es debido a que solo se puede actualizar la medición cuando el disco giró hasta la siguiente ranura, momento en el cual se conoce el tiempo desde la última ranura y se puede calcular la velocidad. Aunque esto se puede mejorar aumentando la cantidad de ranuras en el disco (y en consecuencia la cantidad de pulsos por vuelta), existen limitaciones mecánicas del disco y de resolución del *encoder* que restringen este enfoque.

Por otro lado, ubicar el disco ranurado directamente en la salida del motor otorga dos importantes ventajas: por un lado, dado que el motor gira a mayor velocidad que el eje de salida, se puede reducir el número de ranuras y aun así mantener una frecuencia de actualización alta; por otro lado, permite mayor precisión dado que un pequeño error de medición en velocidad del motor se propaga en un error insignificante al eje de salida debido a las reducciones. Por lo tanto, es posible tener un disco con menor cantidad de ranuras sin causar un impacto significativo en el error de velocidad del vehículo. Sin embargo, esta solución conlleva el desafío de hacer caber el disco ranurado y el *encoder* en el eje del motor, ubicado dentro de la caja de reducción.

Finalmente, se optó por la segunda alternativa. Esto implicó un estudio detallado de las dimensiones de la caja de engranajes para lograr diseñar el disco y una pieza de soporte para el *encoder* que quepan dentro de la caja. En la Figura 11-13 se puede ver ambas piezas diseñadas.

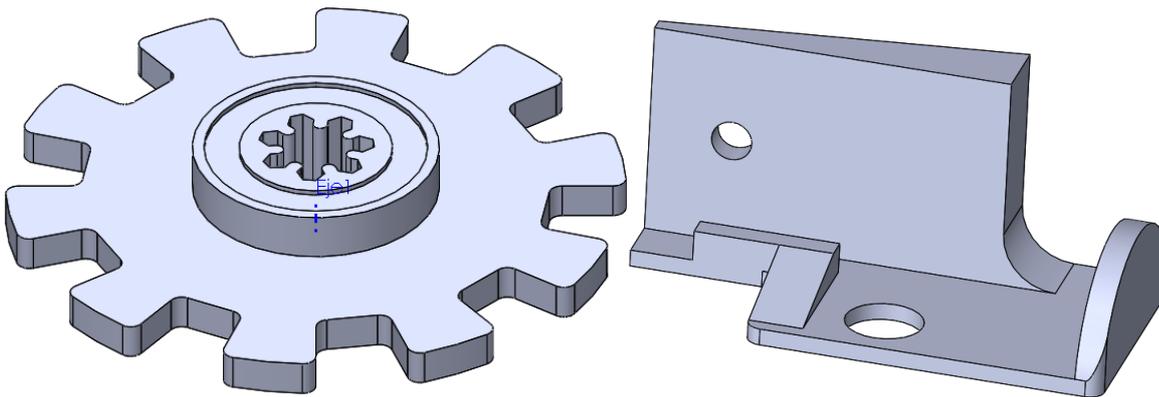


Figura 11-13 Disco ranurado y soporte de encoder.

Cabe señalar que el disco ranurado tiene un diámetro total de 41,7 mm y el soporte de *encoder* 32,5 mm por su lado más largo. Las piezas fueron fabricadas por el método FDM con una impresora 3D. El sensor de velocidad, que incluye al disco ranurado y el *encoder* con su soporte, fue instalado dentro de la caja de reducciones del motor. El resultado se presenta en la Figura 11-14.



Figura 11-14 Montaje del sensor de velocidad.

#### 11.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje

Una vez definido el diseño en CAD, se crearon los planos de cada módulo con las cotas de cada pieza, a fin de poder llevar a cabo la fabricación del AGV. Los planos se encuentran en el anexo. En la Figura 11-15 se puede ver la vista explosionada que representa el proceso de montaje del módulo de tracción y en la Figura 11-16 la del AGV completo.

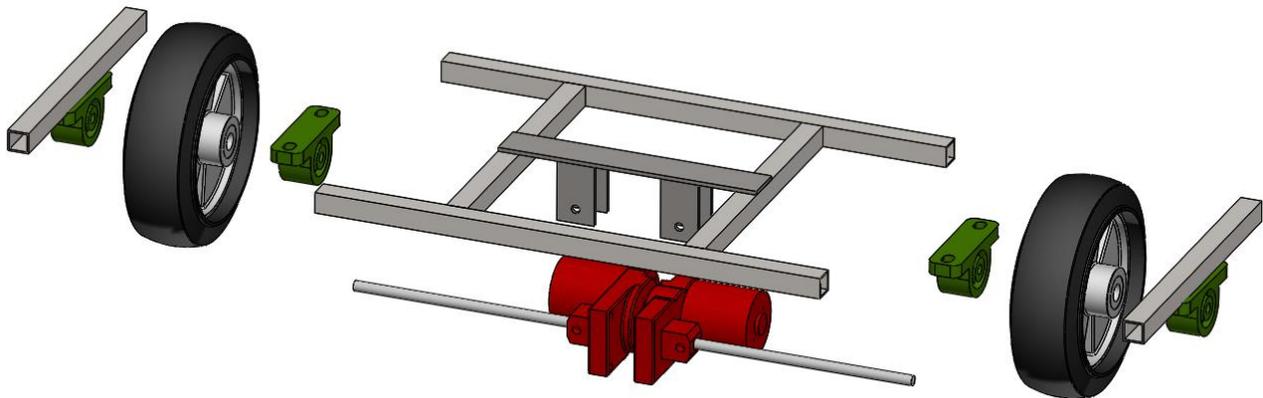


Figura 11-15 Vista explosionada módulo de tracción.

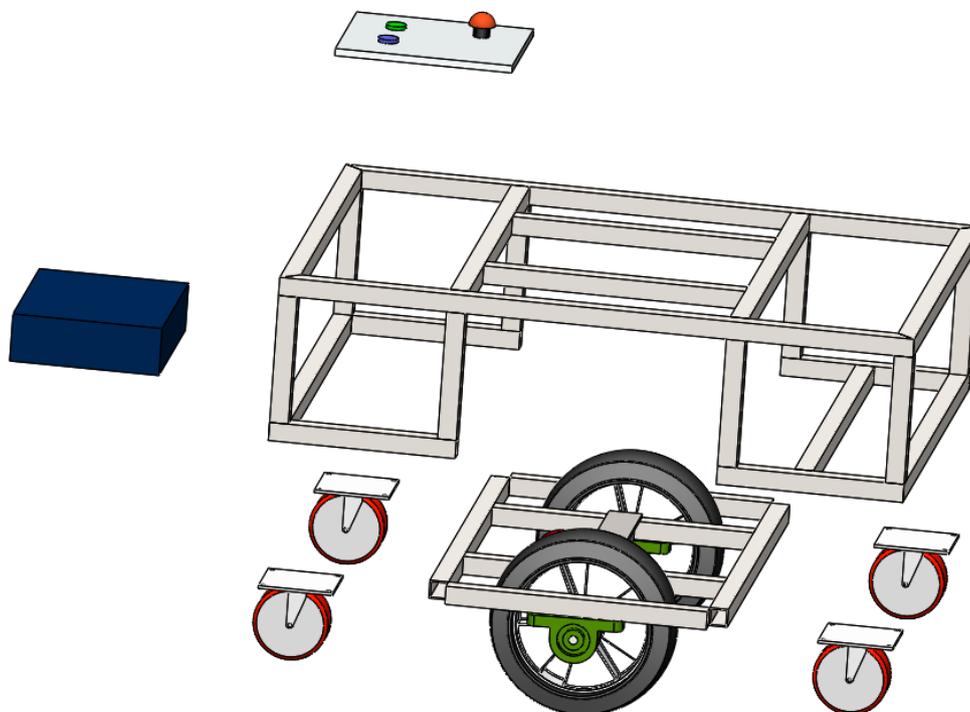


Figura 11-16 Vista explosionada AGV.

Se utilizaron caños estructurales de perfil cuadrado de 25 mm y espesor de 1,6mm. Aunque sería conveniente utilizar un espesor menor para reducir el peso total de la estructura, esto requiere mayor cuidado durante el proceso de soldado ya que se puede perforar los caños inadvertidamente. Contratando a un soldador experimentado y con una máquina soldadora profesional, que tenga por ejemplo tecnología *inverter* para poder regular la potencia finamente, sería posible utilizar caños de 1,2 mm de espesor sin riesgo de perforarlos, mejorando la eficiencia del vehículo al ver su peso reducido. Para soldar los caños se utilizó el método de soldadura por arco, con electrodos E6013 de 2.5mm. La soldadura fue configurada para entregar una corriente de 70 A.

Se debe prestar especial atención al fabricar el módulo de tracción y al espacio en la estructura donde se debe ubicar la tracción. El módulo de tracción debe deslizarse dentro la estructura, por lo que las tolerancias para esa zona del AGV deben ser sumamente estrictas.

Por otro lado, el módulo de tracción se empotra con cuatro pernos a la estructura para fijar la altura. Esta altura queda definida por las ruedas giratorias que se usen, ya que puede ser necesario utilizar ruedas giratorias de mayor radio para terrenos más desafiantes. Es importante tener en cuenta que, al bajar el AGV en el piso de forma totalmente horizontal, las ruedas de tracción deben hacer contacto con el piso antes que las giratorias. Esto es ya que es necesario que tanto el peso del AGV como la carga generen presión sobre las ruedas para que estas tengan fricción con el piso. Si las ruedas giratorias se encuentran en el mismo plano horizontal que las de tracción, las últimas pueden no tener suficiente tracción para hacer avanzar el vehículo y patinarán. Debido a que las ruedas de tracción tienen cámara de aire, cuando se apoya la carga las ruedas se deforman hasta que las ruedas giratorias de las esquinas apoyan, ayudando a soportar el peso de la carga.

### 11.5. Análisis del diseño

Gracias a haber realizado en el programa SolidWorks un diseño realista del AGV, con medidas, materiales y masas reales, fue posible aprovechar las herramientas que éste provee para realizar un análisis de la estructura del vehículo. Aunque el software tiene una gran variedad de herramientas, incluidas herramientas de análisis de elementos finitos para pruebas de deformaciones, de impacto, entre otras, no está en el alcance de este proyecto llevar a cabo un análisis mecánico complejo.

Sin embargo, se analizó un criterio básico para la estabilidad del vehículo que incluye evaluar la ubicación del centro de masa del vehículo. Al ubicar una carga simétrica de 350 x 320 x 175 mm de altura y 10 Kg de peso sobre el vehículo, el centro de masa del conjunto está ubicado a 228 mm del piso y sobre el eje longitudinal del vehículo, a 325 mm de los laterales del vehículo.

A partir de esta información, es posible conocer el ángulo de vuelque del vehículo. Este ángulo indica la inclinación a partir del cual el centro de masa del conjunto vehículo-carga deja de estar apoyado sobre un punto de apoyo, momento en el que el objeto vuelca hacia un lado. Este ángulo se puede obtener fácilmente con la siguiente ecuación:

$$\alpha = 90^\circ - \operatorname{atan}\left(\frac{y_{CM}}{x_{CM}}\right) = 90 - \operatorname{atan}\left(\frac{228}{325}\right) = 54,95^\circ$$

Es decir que el vehículo deberá llegar a tener una inclinación mayor a 54° para que el vehículo vuelque con la carga. Esta situación es sumamente improbable dadas las velocidades de operación.

## 12. Validación de prototipo

### 12.1. Resultados

#### 12.1.1. Estructura del vehículo

Al seguir los pasos establecidos en T-CAR-F se comprobó que las medidas estaban dentro de los márgenes establecidos, al igual que el peso. No se encontraron bordes filosos. Sin embargo, no se consideró la altura de la caja con los elementos electrónicos para las dimensiones, ya que en el producto final esta parte es reubicada dentro del AGV.

#### 12.1.2. Comunicación a través de *Wi-Fi*

Siguiendo los pasos de T-B-COM se comprobó que la luz indicadora de la placa WeMos D1 se encendió representando la conexión a través de *Wi-Fi*, y que los mensajes llegaban periódicamente con una frecuencia mayor a la mínima seteada. Por último, el vehículo continuó con la misión al cerrar la interfaz, cumpliendo así todos los criterios de aceptación.

#### 12.1.3. Funcionamiento de la interfaz de diagnóstico

Se siguieron los pasos de la prueba T-B-DIA variando las constantes del PID de control de los motores y comprobando su distinta respuesta a un escalón de velocidad. Luego se modificó las constantes de PD para el seguimiento del camino, y haciendo un escalón de error por un movimiento controlado del emulador de camino se comprobó una respuesta diferente para cada motor.

#### 12.1.4. Monitoreo de batería

Los pasos de la prueba T-B-BAT fueron seguidos, y se comprobó que la carga de la batería variaba y al bajar de 30% se activaba la señal de batería baja. Es necesario considerar que la interfaz en el momento de la validación se actualizaba lentamente (aproximadamente cada dos segundos), por lo que la variación de carga no era inmediata. En el uso típico del AGV esto no sería un problema, puesto que la carga de la batería varía lentamente.

#### 12.1.5. Comprobación de velocidad de movimiento

Siguiendo los pasos de T-CTRL-VEL se comprobó el control sobre la velocidad de movimiento. Además de los pasos de la prueba, se tomaron mediciones de la velocidad para *setpoints* de velocidad lineal más altos de los que podía tomar el AGV, verificando que recorría el trayecto a la velocidad máxima. También se verificó que sin el peso tuviera la velocidad deseada para dos casos de velocidades.

#### 12.1.6. Modo manual

Al seguir los pasos de T-MANUAL se verificó el manejo manual del dispositivo y la transición sin problemas al modo automático al salir del modo manual.

### 12.1.7. Traslado estable de carga estipulada

Se verificó la estabilidad de la carga al realizar los pasos de T-EST-CARGA. Se realizaron maniobras de ir a máxima velocidad y luego doblar con una rueda frenada para comprobar si la inercia también podía favorecer un volcado, pero la carga permaneció estable.

### 12.1.8. Tiempo de establecimiento a velocidad máxima con carga máxima

Siguiendo los pasos establecidos en T-SETTLING, se obtienen las mediciones de la velocidad angular de cada rueda, y a partir de ello se obtiene la velocidad lineal del vehículo. Luego, esa velocidad es vuelta a muestrear a una mayor frecuencia para hacer la curva más suave. El resultado se observa en la Figura 12-1:

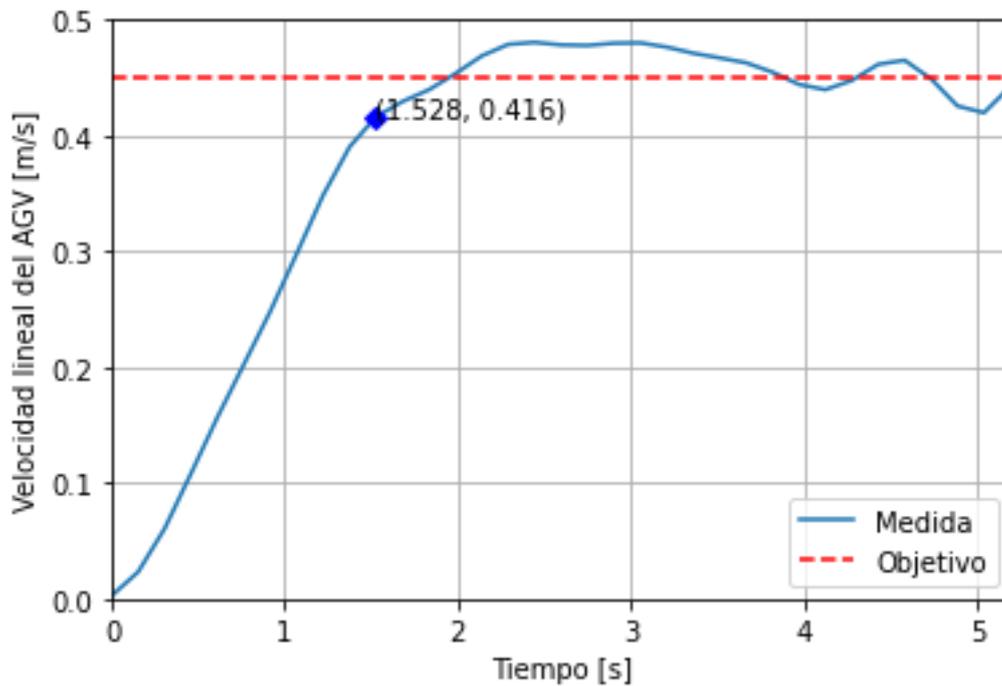


Figura 12-1 Tiempo de establecimiento del vehículo

Se observa que el tiempo de establecimiento al 10% es de un segundo y medio, y luego tiene unas oscilaciones cercanas al valor objetivo. Estas desviaciones se pueden explicar por las irregularidades del piso.

### 12.1.9. Seguimiento de la trayectoria con carga

Llevando a cabo las instrucciones descritas en la especificación de prueba, se obtuvo un desplazamiento promedio de 20 cm para el indicador delantero y una separación promedio de 63 cm para el indicador trasero. Tomando el promedio de estos dos resultados, obtenemos un desplazamiento promedio de 41 cm desde el centro geométrico del vehículo. Como era de esperarse debido al diseño del control, el desplazamiento trasero es mayor al desplazamiento delantero. Mas allá de esto, el resultado final cae dentro del rango especificado en **PER-01**.

#### 12.1.10. Frenado ante pérdida de referencia de trayectoria

Sometiendo el vehículo a las condiciones descriptas en la prueba T-TRAY-02, se observó que el vehículo efectivamente detuvo su estado de operación. Los motores frenaron su movimiento, se señaló el estado de emergencia mediante las luces de la interfaz de usuario y en la aplicación de usuario se indicó el estado de emergencia, debido a que el vehículo ya no identificaba la trayectoria.

#### 12.1.11. Autonomía

Siguiendo las instrucciones de prueba definidas en T-AUTON, con la batería cargada al 100%, se configuró una misión en el vehículo de al menos veinticinco minutos y se cargó el mismo con dos bidones de 5 kg cada uno, superando así la carga máxima especificada. Luego, se verificó que este complete la misión de forma exitosa. La misión implicó recorrer la trayectoria del banco de prueba correspondiente, tomando ambas bifurcaciones. También se pudo observar que, una vez finalizada la misión, el indicador de batería estaba por encima del 45%, probando que el vehículo es capaz de completar la tarea.

#### 12.1.12. Verificación de funcionamiento en misión simple

Para verificar que el vehículo es capaz de completar una misión simple, se siguieron las instrucciones definidas en T-MIS-01. Se pudieron verificar de forma exitosa todas las indicaciones y en ningún momento el vehículo tuvo un comportamiento diferente al indicado en esta serie de pasos.

#### 12.1.13. Manejo de eventos de emergencia, pausa y aborto en la misión

Al seguir los pasos de la prueba T-MIS-02 se verificó el funcionamiento de las acciones sobre misión desde el tablero y desde la aplicación de control, a la vez que se comprobó que las señales lumínicas se activaron adecuadamente.

#### 12.1.14. Verificación de funcionamiento en misión compleja

Se siguieron los pasos de la prueba T-MIS-03, y se verificó la correcta operación del AGV y su correcta notificación tanto en señales lumínicas como en la interfaz de la aplicación.

### 12.2. Consideraciones finales hacia el producto final

Como consideración final, se debe tener en cuenta que el prototipo fue construido con cuatro componentes que no son iguales a los que llevará el producto final. Estos componentes son la batería, la llave termomagnética, el controlador de los motores y los motores. Sin embargo, el producto final no cuenta con prestaciones mayores al prototipo, pero los motores del producto final tienen mayor disponibilidad y capacidad de industrialización que los utilizados.

Es importante aclarar que los componentes mencionados se pueden cambiar en el producto final, con el fin de transportar cargas mayores a mayor velocidad. Esto hace a la escalabilidad del producto diseñado.

Además, es importante mencionar que una vez completado cualquiera de los ensayos de funcionalidad o ensayos de movimiento, el vehículo fue capaz de seguir operando de forma normal. Esto significa que cualquiera de los ensayos se puede repetir de forma secuencial y los resultados son los mismos.

### 12.3. Estudios de confiabilidad de hardware y de software

#### 12.3.1. Confiabilidad de hardware

El análisis que se llevó a cabo para la confiabilidad del *hardware* corresponde a los bloques que son esenciales para que el vehículo pueda cumplir su función en su totalidad y de forma segura. Se utilizó la norma MIL-HDBK-217F para la información respecto a la tasa de fallas de cada componente.

En primer lugar, se plantea el diagrama de confiabilidad en bloques (RBD) funcional del AGV del sistema en la Figura 12-2. Debido a que cada bloque es necesario para que el AGV pueda operar, no hay redundancia en cuanto a la confiabilidad. Se puede apreciar que no aparece el tablero de operaciones dentro de este diagrama, ya que todas las funciones ejecutadas a través del tablero pueden ser realizadas desde la interfaz de comando central. Esta última no se incluyó en el diagrama ya que es un componente externo al AGV y su desarrollo no forma una parte clave del proyecto. Por último, dado que la batería es un componente intercambiable, no se tuvo en cuenta para el estudio de confiabilidad.

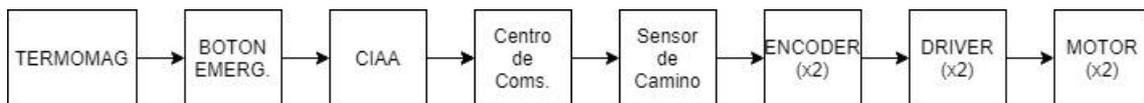


Figura 12-2 RBD global del AGV.

Para conocer la confiabilidad total del AGV, se analizará cada bloque en detalle. Puntualmente, se busca conocer la tasa de fallas  $\lambda$  para cada componente, que representa la cantidad de fallas esperadas por hora. Luego, dado que los componentes no tienen redundancia, se suma la tasa de fallas de cada uno para obtener la tasa de fallas del AGV. Por último, se puede conocer la confiabilidad del AGV, asumiendo  $\lambda$  constante, con la siguiente fórmula:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda \cdot t}$$

Se suele indicar la confiabilidad de un producto a través del tiempo promedio entre fallas o MTBF:

$$MTBF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Para la obtención de los coeficientes, se tomarán condiciones normales de presión y temperatura, considerando el ambiente de operación esperado para un AGV. En los casos donde algún valor no se pueda determinar con certeza, se tomará el peor caso posible.

Las definiciones de los coeficientes están especificadas en la norma [13] y cada uno es específico del componente analizado. Las fórmulas para calcular la tasa de fallas de cada componente están definidas también en esta norma.

### Interruptor Termomagnético

| Componente           | $\lambda_b$ | $\pi_C$ | $\pi_U$ | $\pi_Q$ | $\pi_E$ | # | $\lambda_p$<br>(fallas/ $10^6$ horas) |
|----------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---|---------------------------------------|
| Llave termomagnética | 0,34        | 2,0     | 1       | 1       | 15      | 1 | 10,2                                  |

Tabla 12-1 Confiabilidad de Interruptor termomagnético

$$\lambda_{termica} = 10,2 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

### Botón de emergencia

El botón de emergencia se compone de una parte mecánica de plástico que hace el accionamiento sobre un contacto, el cual se acopla a la parte trasera del botón. El componente utilizado es de la marca Schneider Electric, modelo ZA2EE102. Por lo tanto, es posible buscar la hoja de datos del componente y encontrar que la durabilidad mecánica del mismo es de  $1.500.000^2$  ciclos. Aunque solo se debería accionar ante un raro caso de emergencia, se asume un caso pesimista de cinco accionamientos por día. Esto nos permite sacar la tasa promedio entre fallas equivalente:

$$\lambda_{seguridad} = \frac{5 \text{ ciclos/día}}{1,5 \cdot 10^6 \text{ ciclos/falla}} = \frac{0,2083 \text{ ciclos/hora}}{1,5 \cdot 10^6 \text{ ciclos/falla}} = 0,1388 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

### CIAA

La Computadora Industrial Abierta Argentina (CIAA) también tiene su esquemático publicado de forma abierta. Este módulo se analiza como microcontrolador.

| Componente      | $\pi_T$ | $\pi_L$ | $\pi_E$ | $\pi_Q$ | C1   | C2    | # | $\lambda_p$<br>(fallas/ $10^6$ horas) |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|------|-------|---|---------------------------------------|
| Microprocesador | 0,35    | 1,0     | 0,5     | 4,0     | 0,56 | 0,053 | 1 | 0,89                                  |

Tabla 12-2 Confiabilidad de CIAA

$$\lambda_p = 0,89 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

<sup>2</sup> <https://www.se.com/th/en/product/ZA2EE102/single-contact-block-for-head-%C3%B822---1-nc/>

## Centro de Comunicaciones

| Componente                            | $\lambda_B$ | $C_1$ | $C_2$  | $\pi_L$ | $N_2$ | $\pi_T$ | $\pi_Q$ | $\pi_E$ | $\pi_P$ | $\pi_S$ | $\pi_C$ | $\pi_V$ | $\lambda_P$<br>(fallas/10 <sup>6</sup><br>horas) |
|---------------------------------------|-------------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Capacitor electrolítico (x1)          | ,00012      | -     | -      | -       |       | 1,3     | 10      | 10      | -       | -       | 1,65    | 1       | 0,025  |
| Capacitor SMD (x5)                    | ,00099      | -     | -      | -       |       | 1,3     | 10      | 10      | -       | -       | 1       | 1       | 0,128  |
| Resistencia                           | 0,0037      | -     | -      | -       |       | 2,8     | 3       | 16      | 0,58    | 1,9     | -       | -       | 0,548  |
| Microprocesador (ESP)                 | -           | 0,56  | 0,0056 | 1       |       | 0,13    | 2       | 2       | -       | -       | -       | -       | 0,168  |
| Integrado (MAXIM3232)                 | -           | 0,08  | 0,0026 | 1       |       | 0,13    | 2       | 2       | -       | -       | -       | -       | 0,0312   |
| Soldadura manual a través de agujeros | 0,00011     | -     | -      | -       | 15    | -       | 2       | 2       | -       | -       | 1       | -       | 0,0924   |

Tabla 12-3 Confiabilidad de placa de centro de comunicaciones

$$\lambda_{com} = 0,993 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

*Sensor de camino*

| Componente                            | $\lambda_B$ | $C_1$ | $C_2$  | $\pi_L$ | $N_2$ | $\pi_T$ | $\pi_Q$ | $\pi_E$ | $\pi_C$ | $\pi_V$ | $\lambda_P$<br>(fallas/ $10^6$<br>horas) |
|---------------------------------------|-------------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Capacitor electrolítico (x1)          | .00012      | -     | -      | -       | -     | 1.3     | 10      | 10      | 1.65    | 1       | 0.025                                    |
| Capacitor SMD (x5)                    | .00099      | -     | -      | -       | -     | 1.3     | 10      | 10      | 1       | 1       | 0.128                                    |
| Microprocesador (OpenMV)              | -           | 0.56  | 0.0056 | 1       | -     | 0.13    | 2       | 2       | -       | -       | 0.168                                    |
| Integrado (MAX485)                    | -           | 0.08  | 0.0026 | 1       | -     | 0.13    | 2       | 2       | -       | -       | 0.0312                                   |
| Soldadura manual a través de agujeros | 0.00011     | -     | -      | -       | 20    | -       | 2       | 2       | 1       | -       | 0.1232                                   |

Tabla 12-4 Confiabilidad de placa de sensado de camino

$$\lambda_{cam} = 0.475 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

*Encoders*

Como ya se mencionó, el sensor de velocidad es conocido como FC-03 y, aunque no fue diseñado por el equipo, el esquemático está disponible en la red<sup>3</sup>. A continuación, se plantea cada uno de los componentes que hacen a la confiabilidad del sensor. Dado que todos los componentes deben funcionar para que el módulo opere, la tasa de fallas final será la suma de cada componente:

---

<sup>3</sup> <https://i.pinimg.com/originals/80/dc/6a/80dc6ab793281333ef06bd7568c56bba.jpg>

| Componente          | $\lambda_B/C_1$ | $\pi_T$ | $\pi_Q$ | $\pi_E$ | $\pi_P/\pi_A$ | $\pi_S/\pi_L$ | $C_2$  | $\lambda_p$<br>(fallas/ $10^6$ horas) |
|---------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------------|---------------|--------|---------------------------------------|
| Fotodiodo           | 0,0040          | 3,4     | 8       | 8       | -             | -             |        | 0,8704                                |
| Fototransistor      | 0,0055          | 3,4     | 8       | 8       | -             | -             |        | 1,1968                                |
| Resistencia (x5)    | 0,0037          | 2,8     | 3       | 16      | 0,58          | 1,9           |        | $0,548 \times 5 = 2,74$               |
| Comparador<br>LM393 | 0,0025          | 2,8     | 2       | 4       | 1             | 1             | 0,0026 | 0,0348                                |

Tabla 12-5 Confiabilidad de encoders

$$\lambda_{encoder} = 4,842 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

#### Controladores de motor

De la misma forma que para el caso de los encoders, la placa que controla los motores no fue diseñada por el equipo, pero el esquemático de la misma también es público (ver Figura 15-2). Luego, se calcula la confiabilidad de cada uno de los componentes que integran la placa.

| Componente                     | $\lambda_B/C_1$ | $\pi_T$ | $\pi_Q$ | $\pi_E$ | $\pi_V$ | $\pi_C$ | $\pi_S/\pi_L$ | $C_2$    | # | $\lambda_p$<br>(fallas/ $10^6$ horas)         |
|--------------------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|----------|---|---|
| 0,0040 Full-Bridge<br>L298N IC | 0,01            | 3,4     | 10,0    | 4,0     | -       | -       | 1,0           | $5,6E-3$ | 1 | $5,64E-01$                                    |
| 0,0055 Regulador<br>78M05      | 0,01            | 0,15    | 10,0    | 4,0     | -       | -       | 1,0           | 0,001    | 1 | $5,50E-02$                                    |
| 0,00372,81,9 Diodo             | 0,002           | 2,0     | 5,5     | 9,0     | -       | 1,0     | 1,0           | -        | 8 | 1,584   |
| Capacitor                      | $1,2E-4$        | 1,3     | 10      | 20      | 1,0     | 3,4     | -             | -        | 2 | $2,22E-03$ ,<br>$0,03481E-01$ ,<br>$12,12E-1$ |

Tabla 12-6 Confiabilidad de controlador de motor

$$\lambda_{driver} = 1,04 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

## Motores

| Componente | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\alpha_B$ | $\alpha_W$ | A   | B   | # | $\lambda_p$<br>(fallas/10 <sup>6</sup><br>horas) |
|------------|-------------|-------------|------------|------------|-----|-----|---|--|
| Motor DC   | 0,13        | 0,13        | 78000      | 8,9E5      | 1,9 | 1,1 | 2 | 2,02   |

Tabla 12-7 Confiabilidad de motores

$$\lambda_p = 2,02 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{ horas}}$$

## Confiabilidad del sistema y disponibilidad

Se evaluó la confiabilidad del sistema completo, para conocer el tiempo medio entre fallas del vehículo y finalmente obtener la vida útil esperada. Para la confiabilidad del sistema, se combina la tasa de fallas de cada componente según la Figura 12-2 y se calcula el tiempo medio entre fallas:

$$\Rightarrow \lambda_{SYS} = \sum \lambda_i = 1.9569 \cdot 10^{-5} (h^{-1})$$

$$\Rightarrow MTBF = 51.100,71 \text{ horas} = 5,83 \text{ años}$$

Este valor es superior al especificado y por lo tanto cumple con lo necesario para el proyecto. Vale la pena mencionar que el principal componente que afecta a la confiabilidad del sistema es el interruptor termomagnético, dado que su tasa de fallas es muy elevada. Esto se puede mejorar, por ejemplo, seleccionando componentes de calidad militar, pudiendo así mejorar las prestaciones del equipo. Otro enfoque más económico resulta de tratar a este componente como un consumible, haciendo un cambio periódico del componente durante el mantenimiento regular que se debe hacer sobre el vehículo.

Por último, con el resultado de la cantidad de fallas esperadas en un millón de horas ( $\lambda_p$ ), podemos calcular la confiabilidad del dispositivo en el tiempo, la vida útil y la disponibilidad de este. Las ecuaciones que definen la confiabilidad y la vida útil son las siguientes:

$$\text{Confiabilidad} \rightarrow R(t) = e^{-\lambda_p \frac{t}{10^6}}$$

$$\text{Vida útil} \rightarrow t_{util} = \ln\left(\frac{1}{1-k}\right) \frac{10^6}{\lambda_p}$$

Siendo  $k$  el porcentaje de unidades que se espera que fallen.

En la Figura 12-3 se puede observar la confiabilidad del vehículo en el tiempo. Como se puede observar, la confiabilidad tras un año de uso es del 84,2 %, tras cinco años es del 42,4 % y tras diez años es del 18 %.

Tomando un valor de  $k = 0,01$ , lo cual implica un 1% de unidades fallidas, da como resultado un tiempo de vida útil  $t_{util} = 0,06 \text{ años}$ . Si tomamos un valor de  $k = 0,1$  obtenemos un tiempo de vida útil  $t_{util} = 0,61 \text{ años}$ . Dado que estos valores de confiabilidad y tiempo de vida útil están dentro de las especificaciones de diseño, no fue necesario plantear ningún tipo de redundancia.

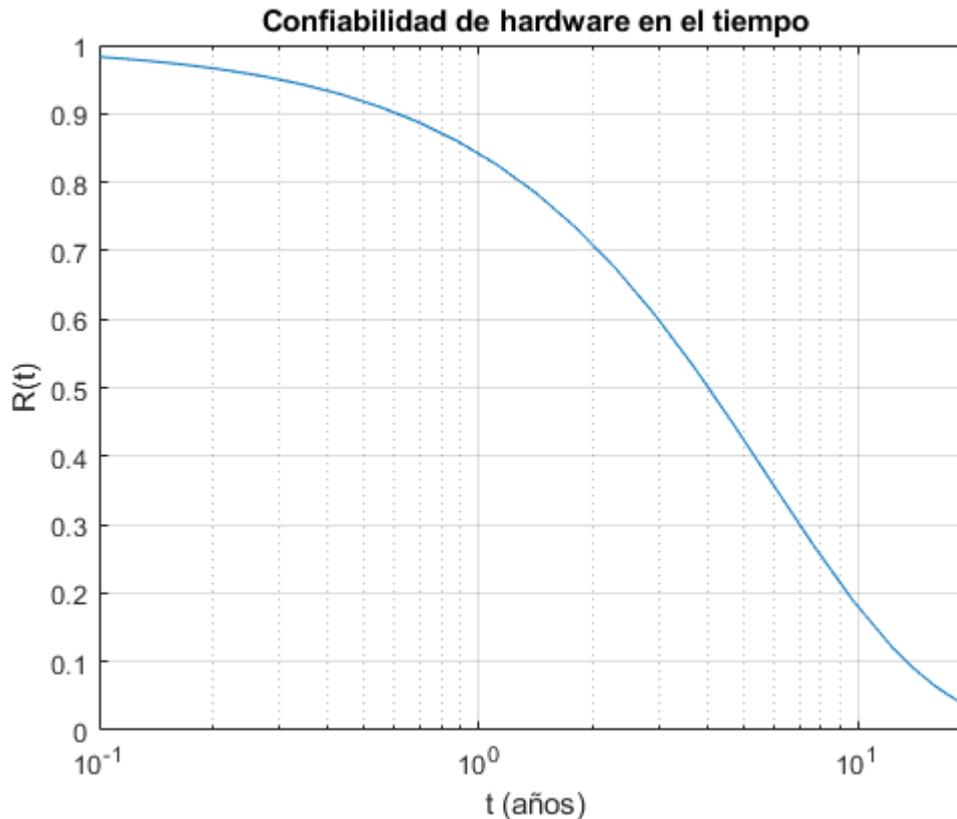


Figura 12-3 Confiabilidad en el tiempo

La disponibilidad del AGV queda definida por el porcentaje de tiempo que este se encuentra funcional, dentro del rango de vida útil. Este parámetro queda definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad} \rightarrow D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Siendo *MTTR* el tiempo medio de reparo. Entonces, basándonos en la experiencia de desarrollo, los puntos críticos del sistema, el tiempo que lleva ensamblar el dispositivo y las experiencias en las que tuvimos que reparar alguna falla, asumimos un tiempo medio de reparo *MTTR* = 3 horas. Reemplazando estos resultados en la ecuación de disponibilidad, da como resultado  $D = 99,9\%$ .

Como se puede observar, estos resultados cumplen con las especificaciones del proyecto. Hay componentes que tienen un gran impacto en el resultado final. Es importante tener en cuenta que estos son parte del prototipo y no implican un costo mayor frente a la unidad del AGV, en el caso que se quiera mejorar estos parámetros.

### 12.3.2. Confiabilidad de software

Se analiza la confiabilidad de software del código de la CIAA, dado que los otros módulos programables tienen versiones estables y la cantidad de líneas de código de ellos es despreciable frente a las de la CIAA.

### *Predicción de la tasa de fallas*

En las etapas tempranas del desarrollo, es difícil calcular una confiabilidad del software que controlará al vehículo. En general, solo son aplicables modelos de predicción de la confiabilidad, como puede ser el modelo de MUSA. Este modelo permite predecir la intensidad inicial de las fallas del software basándose en valores empíricos, ya sea de datos históricos de desarrollos similares o de la experiencia y criterio de la organización que busca predecir la confiabilidad.

Para poder utilizar el modelo de MUSA, se deben definir ciertos valores del sistema que se está desarrollando:

- K: se estima en  $4,2e-7$ .
- P: equivale a  $R^*(SLOC/ER)$ 
  - R: es el promedio de ejecución de instrucciones. La CIAA-NXP utiliza un procesador Cortex-M4 que según el fabricante es capaz de procesar 1,25 DMIPS/MHz. Por otro lado, el procesador es capaz de operar a 200MHz. Luego, se puede estimar R en 250 DMIPS, donde DMIPS representa millones de instrucciones por segundo del ensayo de rendimiento Dhrystone<sup>4</sup>.
  - ER: Constante que depende del lenguaje utilizado. En nuestro caso, toda la programación se realiza en C por lo que equivale a un ER de 2,5.
  - SLOC: debido a que se va a utilizar un RTOS para cada uno de los módulos descritos en la sección 9.1.1, es posible asumir independencia entre los módulos de software y analizar cada uno por separado. Luego, podemos analizar la cantidad de líneas que implica llevar a cabo las funcionalidades de cada módulo:
    - Centro de control: 328 líneas.
    - Control de trayectoria: 350 líneas.
    - Control de movimiento: 300 líneas.
    - Procesamiento de camino: 440 líneas.
    - Centro de comunicación: 350 líneas.
    - Tablero de operaciones: 200 líneas.
    - Sistema de seguridad: 90 líneas.
    - **Total:** 2058 líneas de código.

---

<sup>4</sup> <https://developer.arm.com/documentation/dai0273/a>

El código del RTOS no se incluye ya que está validado por una innumerable cantidad de proyectos que lo utilizan. Se puede pensar como que este código se utiliza en el producto, pero tiene una confiabilidad de valor 1, por lo cual no se la toma para esta predicción.

- $W_0$ : es la estimación del número inicial de fallas del programa. Ya que no se cuenta con datos pasados, este número se lo asume como 6 fallas / 1000 SLOC.

Luego, para calcular la tasa de fallas con el modelo de MUSA se lleva a cabo la siguiente cuenta:

$$\lambda_0 = k \cdot p \cdot W_0 = 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{250 \cdot 10^6}{2058/2,5} \cdot \frac{6}{1000} = 7,65 \cdot 10^{-4} \frac{\text{fallas}}{\text{seg}}$$

Esto equivale a presentar 1 falla cada 22 minutos. Aunque este número de fallas es elevado, es una estimación inicial de la cantidad de fallas en la etapa de desarrollo del producto.

Para conocer una estimación de los defectos esperados en una versión liberada a producción, es necesario utilizar modelos de estimación, con datos obtenidos a partir de conteo de fallas.

#### *Estimación de la tasa de fallas*

Durante el desarrollo del código de la CIAA se contabilizó los errores críticos de código entre cada reunión presencial, con el objetivo de estimar la confiabilidad del software. Para hacerlo, se utilizó el modelo de Shooman que propone una confiabilidad dada por:

$$R(t) = e^{-k(\varepsilon_T - \varepsilon_C(\tau))t} = e^{-\lambda t}$$

Donde  $\varepsilon_T$  es la cantidad de errores sobre instrucciones total,  $\varepsilon_C(\tau)$  la cantidad de errores corregidos sobre el total de instrucciones ( $I_T$ ) luego de un tiempo de depuración  $\tau$  y  $k$  un factor de ajuste. Este modelo presenta las ventajas del modelo exponencial, pero utiliza una normalización por las líneas de código. Esta ventaja lo hace un modelo más fiel a la realidad para este análisis. Con esta fórmula, se obtiene que el MTBF está dado por:

$$MTBF = \frac{1}{k \left( \frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_C(\tau) \right)} = \frac{1}{\lambda}$$

Para estimar las incógnitas de este modelo ( $k, E_T$ ) es necesario tomar dos mediciones de los errores durante el desarrollo y estimarlos. Al tener múltiples mediciones, se promedian los parámetros estimados para un menor error. Si llamamos con el subíndice  $i$  a  $i$ -ésima muestra, los parámetros son estimados como:

$$\hat{E}_T = \frac{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} E_C(\tau_1) - E_C(\tau_2)}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1}$$

$$\hat{k} = \frac{\lambda_1 I_T}{\hat{E}_T - E_C(\tau_1)}$$

Se vuelcan las mediciones a la Tabla 12-8:

| Reunión presencial | Commits a master | Horas trabajadas acumuladas | $E_T$ acumulados | $E_C$ acumulados | $\lambda_i \left[ \frac{fallas}{h} \right]$ | $\hat{E}_T$ | $\hat{k}$ |
|--------------------|------------------|-----------------------------|------------------|------------------|---|-------------|-----------|
| 1                  | 35               | 420                         | 10               | 9                | 0,0238                                      |             |           |
| 2                  | 17               | 624                         | 14               | 12               | 0,0224                                      |             |           |
| 3                  | 41               | 1116                        | 18               | 16               | 0,0161                                      | 26,23       | 3,24      |
| 4                  | 23               | 1392                        | 20               | 18               | 0,0143                                      | 34,31       | 1,81      |
| 5                  | 39               | 1860                        | 21               | 20               | 0,0112                                      | 27,33       | 3,16      |
| 6                  | 22               | 2124                        | 22               | 21               | 0,0103                                      | 32,10       | 1,91      |
| 7                  | 14               | 2292                        | 22               | 22               | 0,0095                                      | 34,64       | 1,56      |

Tabla 12-8 Estimación de confiabilidad de software

Se remarca que, al no tener las horas trabajadas contabilizadas, se estimaron a través de las versiones del código subidas al control de versiones hasta la fecha (*commits*) en la ramificación principal. Se tomó un promedio de 4 horas por integrante del grupo por *commit*.

Con las estimaciones de los parámetros promediadas se obtiene:

$$\hat{E}_T = 30$$

$$\hat{k} = 2,341$$

$$MTBF = 602h$$

Este resultado resulta ser más acertado que el modelo predictivo, ya que en el tiempo de trabajo no se notaba la cantidad de errores predichas por el primer modelo. Sin embargo, este tiempo entre fallas es considerablemente menor frente al tiempo entre fallas del hardware, e indica que para mejorar la confiabilidad del equipo es necesario continuar el proceso de *debugging*.

### 12.3.3. Confiabilidad del dispositivo

El tiempo entre fallas total del vehículo queda definido principalmente por la confiabilidad del software. A medida que se solucionan los diferentes problemas, se espera que haya una reducción de la tasa de fallas. Por otro lado, si se actualiza el software de forma continua, la tasa de fallas de este se mantiene en el tiempo. Teniendo en cuenta que la confiabilidad del software está por debajo de la confiabilidad del hardware, la tasa de fallas del software es la que determina la confiabilidad total del vehículo.

## 13. Conclusiones

### 13.1. Cumplimiento de Objetivos

Se desarrolló una solución de bajo costo y funcional. A partir de este diseño se puede obtener un producto comercial para traslado de cargas más pesadas con un tiempo de desarrollo significativamente menor. Además, es escalable en otros aspectos, como en la posibilidad de instalar una red de AGVs funcionando en la misma planta y la posibilidad de agregarle funcionalidades.

Durante el desarrollo se presentaron diversos desafíos de índole electrónica, mecánica y computacional. Sin embargo, utilizando herramientas aprendidas durante la carrera y otras herramientas incorporadas durante el desarrollo, estos desafíos se superaron satisfactoriamente.

### 13.2. Lecciones aprendidas

Un gran aprendizaje fue la importancia de la planificación a la hora de abordar un proyecto de esta magnitud, ya que en numeradas situaciones se produce una tendencia a abordar un problema sin dedicar el debido tiempo a planificar. Sin embargo, en un proyecto de estas características resulta fundamental, ya que de lo contrario se corre un gran riesgo de incurrir en tareas innecesarias o de alcanzar una solución más compleja de lo que realmente hubiera sido necesario y, por ende, menos eficiente que si se hubiera planificado con tiempo y criterio.

El hecho de planificar, sin embargo, conlleva una cuota de incertidumbre que es inevitable en el desarrollo de un proyecto, lo cual requiere una gran capacidad de adaptación. Un claro ejemplo de esto fue la pandemia ocurrida durante el proyecto que, particularmente en Argentina, implicó una cuarentena de prácticamente ocho meses y que coincidió con el período de pleno desarrollo e implementación del proyecto. Esto significó un gran esfuerzo para cumplir los objetivos con éxito.

De la mano de la planificación, la disciplina y la dedicación son fundamentales, ya que sin ellas la planificación no genera resultados. Por este motivo es crucial definir objetivos claros, de común acuerdo y, por sobre todo esto, mantener el diálogo con el equipo. Además, es importante realizar un seguimiento constante del proyecto con la finalidad de mantener a todos los integrantes al tanto y de poder resolver inconvenientes en forma conjunta, independientemente de cuál sea el problema o quién lo haya encontrado.

Por último, en este proyecto se vio reflejada la utilidad de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, incluso aquellos provenientes de materias del período inicial. Estos son generalmente menospreciados por los estudiantes, pero en efecto resultaron sumamente útiles y permitieron abordar un proyecto de carácter multidisciplinario y profesional.

### 13.3. Recomendaciones para futuros diseños

En el caso particular de este proyecto, originalmente se definieron los requerimientos con un cliente cuya intención era la de brindar apoyo económico para poder llevar a cabo el producto. Sin embargo, este apoyo económico no se concretó, cambiando de forma rotunda el curso de la investigación y el desarrollo del producto. A futuro, se cree conveniente establecer detalladamente y con anticipación la forma en la que va

## Conclusiones

a ser administrada la financiación, ya que, al ser un factor influyente, puede alterar en gran medida el rumbo del proyecto.

Por último, una cuestión no menor radica en la trascendencia de adquirir conocimientos de profesionales referentes en el área, y para este trabajo se consultó a una serie de profesionales en la materia. Sin embargo, la situación vivida producto de la pandemia dificultó y desalentó esta posibilidad, y es un hecho que se cree podría haber favorecido al desarrollo del proyecto.

## 14. Bibliografía

- [1] J. Machotka, Z. Nedic and A. Mohtar, "A Compact and Affordable BLDC Motor Controller for a Microelectronics Remote Laboratory.," 2008.
- [2] "Brushless motors," nidec, [Online]. Available: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [3] "Understanding Brushless DC Motor Benefits," OrientalMotor, [Online]. Available: <https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/brushless-dc-motors-agv-designs.html>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [4] B. Horan, Z. Najdovski, T. Black and S. Narhavandi, "OzTug mobile robot for manufacturing transportation," *IEEE International Conference of Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 3554-3560, 2011.
- [5] Roboteq, "MGS1600GY Datasheet," 2018.
- [6] "Batteries for mobile robots," [Online]. Available: <http://www.inf.fu-berlin.de/lehre/WS02/robotik/Vorlesungen/Vorlesung5/ComparisonBattery.pdf>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [7] "AGV types of battery," agvnetwork, [Online]. Available: <http://www.agvnetwork.com/agv-types-of-battery#lithium>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [8] F. Montero Schepens, "Plan de negocios : VIA, Vehículos Industriales Autónomos," 2017.
- [9] "Beneficios de las SAS," fundarargentina, [Online]. Available: <https://www.fundarargentina.org/10-beneficios-de-las-sas/>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [10] "Resolución 171/2016," infoLEG, [Online]. Available: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/260000-264999/263141/norma.htm>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [11] "CIAA - Industria," CIAA, [Online]. Available: <http://www.proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=industria>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [12] R. Barry, *Mastering the FreeRTOS™ Real time kernel*, 2016.
- [13] "Reliability prediction of electronic equipment (MIL-HDBK-217F)," 1991.
- [14] S. Chauhan, "Motor Torque Calculations For Electric Vehicle," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 4, 2015.

- [15] L. Lynch, T. Newe, J. Clifford, J. Coleman, J. Walsh and D. Toal, "Automated Ground Vehicle (AGV) and Sensor Technologies- A Review," *12th International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 2018.
- [16] "Batteries cell comparison," epectec, [Online]. Available: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [17] "PID Library," Arduino, [Online]. Available: <https://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary/>. [Accessed 1 Febrero 2021].
- [18] "Ley 24240," InfoLEG, [Online]. Available: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/638/texact.htm>. [Accessed 1 Febrero 2021].

## 15. Anexos Técnicos

En esta sección del informe deben de presentarse todos los documentos que sean importantes para el seguimiento y entendimiento del proyecto.

### 15.1. Esquemáticos

Esquemáticos generales de conexión:

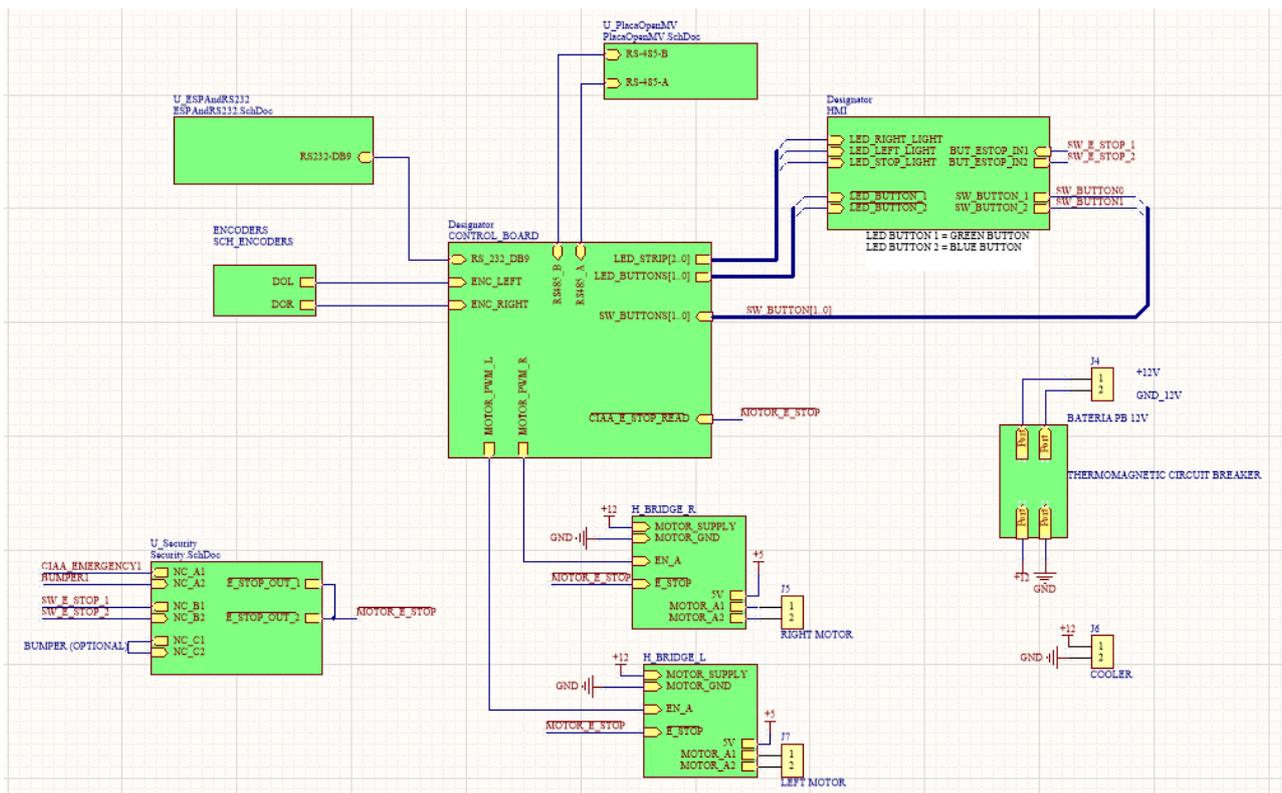


Figura 15-1 Esquemático general del AGV

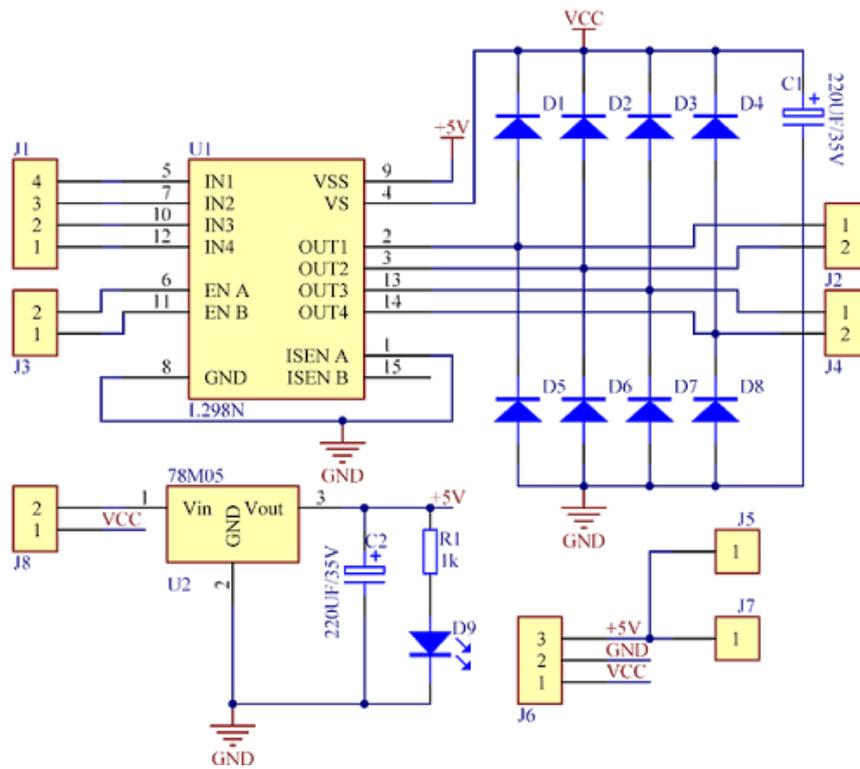


Figura 15-2 Esquemático del controlador de los motores

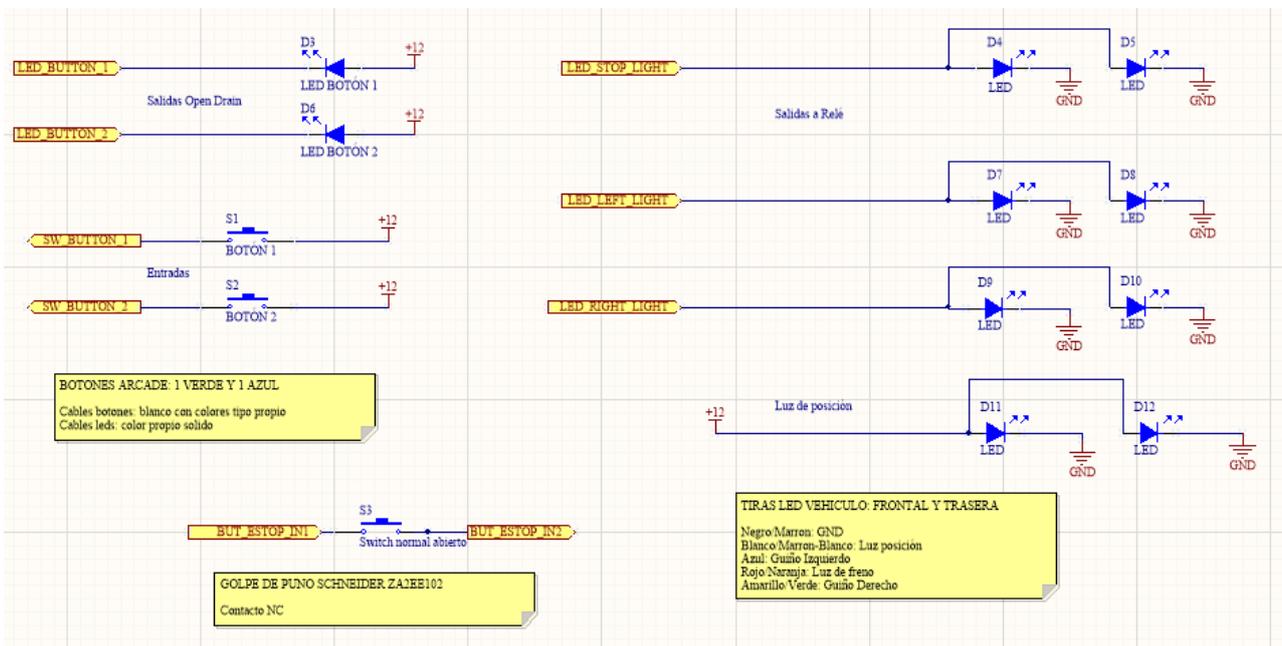


Figura 15-3 Esquemático de la interfaz de usuario

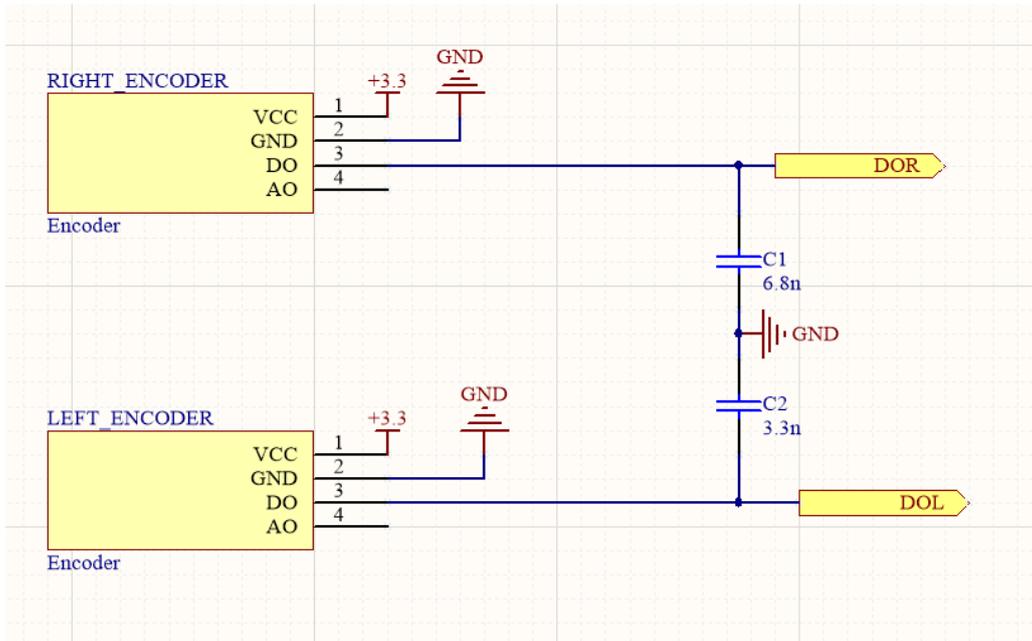


Figura 15-4 Esquemático de conexión de los encoders

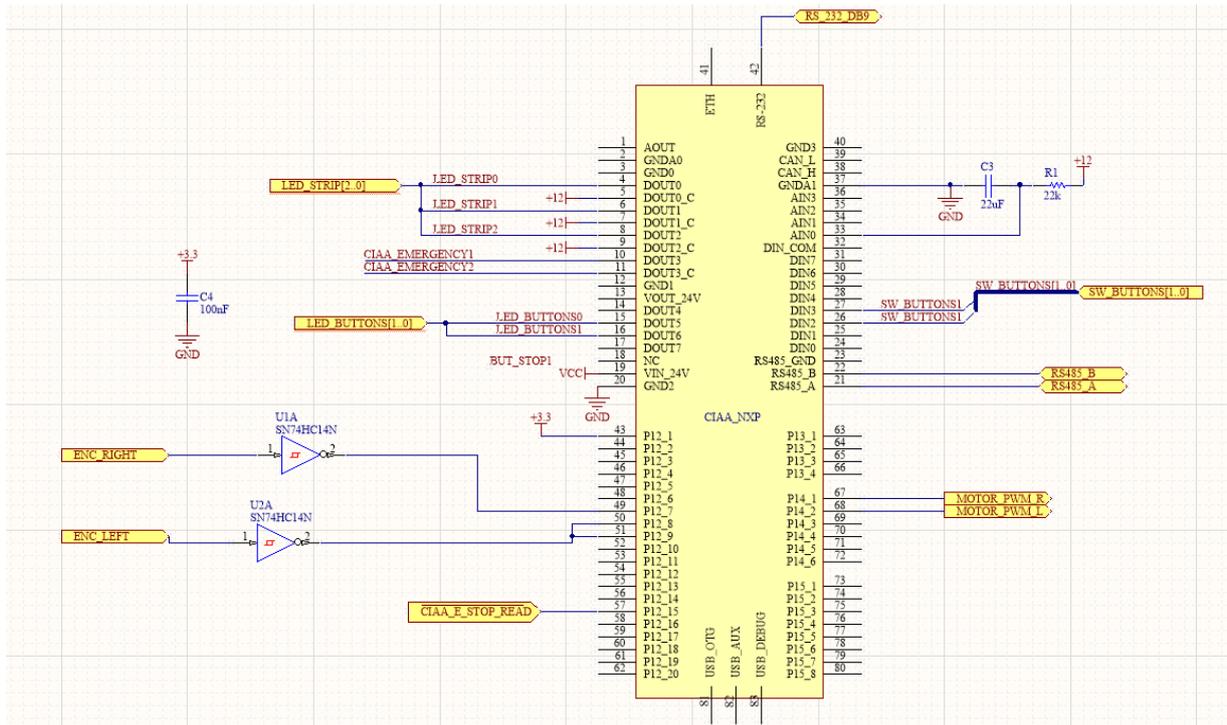


Figura 15-5 Esquemático de conexión de la CIAA

15.2. Planos del diseño mecánico

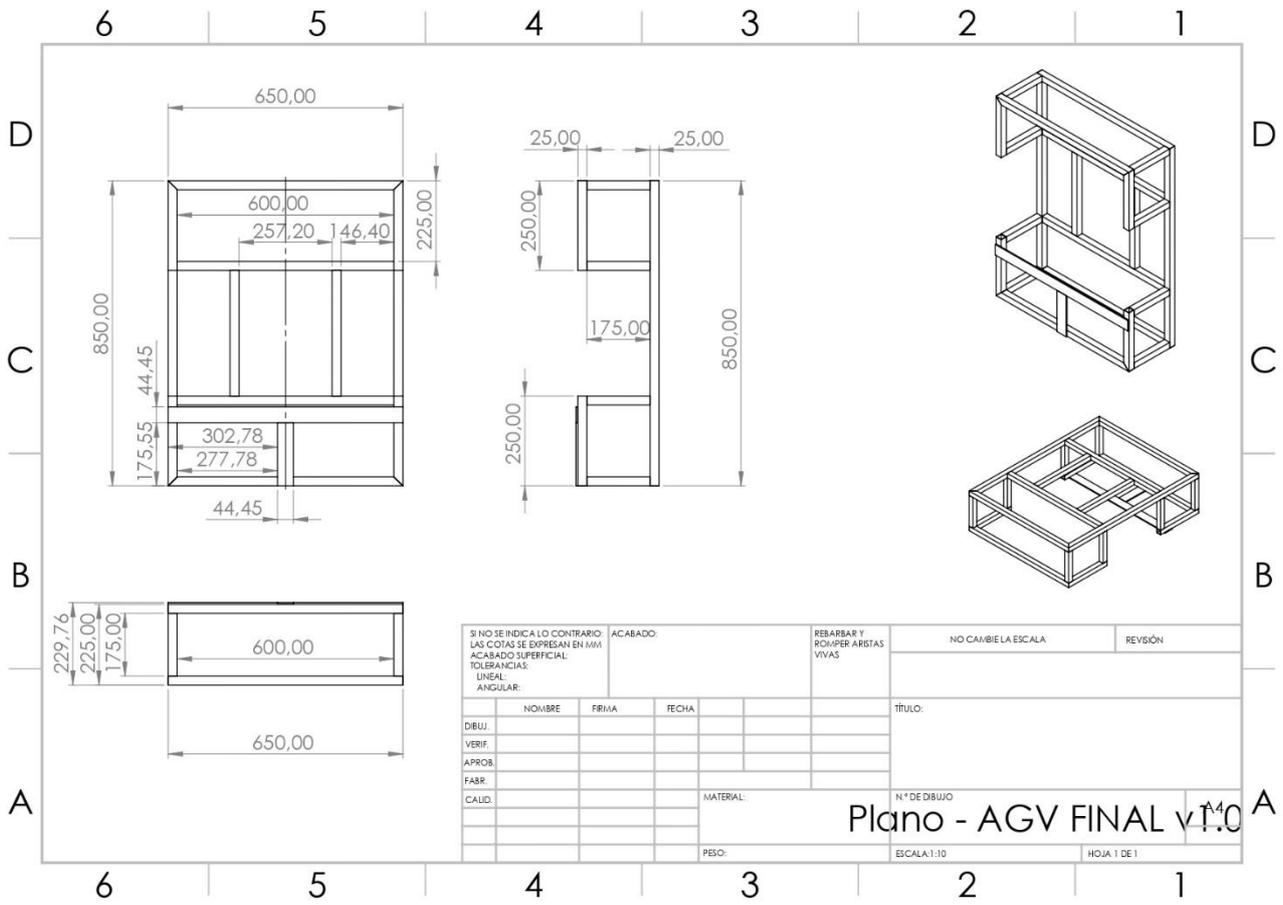


Figura 15-6 Plano mecánico de la estructura

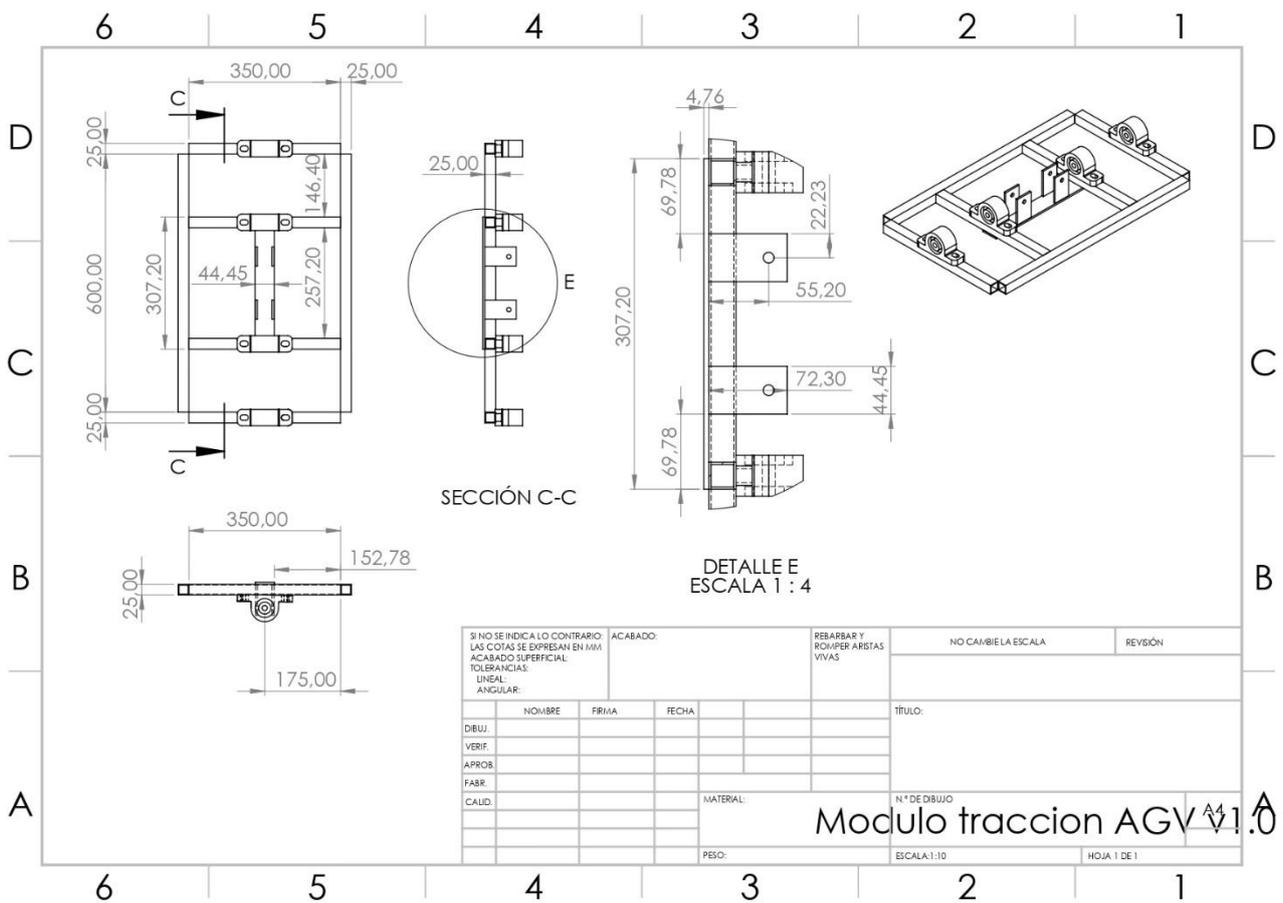


Figura 15-7 Plano mecánico del módulo de tracción

### 15.3. Notas de aplicación

Las notas de aplicación de los componentes más relevantes se encuentran adjuntas en los archivos adicionales del proyecto. Cabe destacar que la nota de aplicación de "Motor Torque Calculations For Electric Vehicle" se obtuvo del siguiente documento [14].

### 15.4. Códigos de Software

Se adjunta el código en la carpeta "Código". Dentro de ella se encuentran los archivos de los 5 módulos programados.