

Proyecto final de Ingeniería Electrónica

Sistema autónomo de cortado de césped

Autores: Falconaro, Sebastián (54089)
Inhargue, Ignacio (57681)
Kuracz, Gaston (53049)
Morcillo Rosso, Ezequiel (56004)

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

Fecha: 09/11/2020

1. Agradecimientos

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

A nuestros amigos, compañeros de vida.

Al Departamento de Electrónica, que fue nuestro segundo hogar durante todos los años de nuestra formación.

A Jorge y Gabriel por estar siempre con una sonrisa.

Al Pechi que se nos fue muy temprano.

2. Índice

1.	Agradecimientos	2
2.	Índice	3
3.	Lista de Figuras	8
4.	Lista de Tablas	11
5.	Índice de Acrónimos	13
6.	Índice de Definiciones	15
7.	Resumen	18
8.	Introducción	19
8.1.	Antecedentes	19
8.2.	Contexto del Proyecto	19
9.	Objetivos	20
9.1.	Finalidad del proyecto	20
9.2.	Planteamiento del problema a resolver	20
9.3.	Alcance	20
10.	Definición de Producto	21
10.1.	Requerimientos de Cliente	21
10.1.1.	Relevamiento de Datos	21
10.1.2.	Casa de Calidad	28
10.1.3.	Requerimientos finales para trazabilidad	29
10.2.	Diagrama Funcional de Interfaces	30
10.3.	Especificaciones de Diseño	30
10.3.1.	Especificaciones Funcionales	31
10.3.2.	Especificaciones de Interfaz	32
10.3.3.	Especificaciones de Performance	34
10.3.4.	Especificaciones de Implementación	35
10.3.5.	Especificaciones de Servicio (RAMS)	37
11.	Plan de Validación	39
11.1.	Diseño de Bancos de Pruebas	39
11.2.	Especificaciones de Tests	41
11.3.	Especificaciones de Simulaciones	47
11.4.	Matriz de Trazabilidad de Validación	50

11.5.	Diagrama de dependencias	53
12.	Análisis de Factibilidad	54
12.1.	Factibilidad tecnológica	54
12.1.1.	Esquema Modular	54
12.1.2.	Propuestas de Alternativas de Diseño	54
12.1.2.1.	Módulo Central	54
12.1.2.2.	Base de carga	56
12.1.2.3.	Posicionamiento	56
12.1.2.4.	Detección de objetos	57
12.1.2.5.	Motores	59
12.1.2.6.	Sensores de Corriente	60
12.1.3.	DFMA	61
12.2.	Factibilidad de Tiempos	62
12.2.1.	Diagrama de PERT del proyecto	62
12.2.2.	Diagrama de Gantt para el diseño y desarrollo del prototipo	63
12.3.	Factibilidad económica	65
12.3.1.	Modelo de negocios, ciclo de vida y análisis de mercado	65
12.3.2.	Costos	66
12.3.3.	Ingresos	68
12.3.4.	Flujo de fondos y rendimiento	68
12.4.	Factibilidad legal	70
12.4.1.	Organización Societaria	70
12.4.2.	Patentamiento	70
12.4.3.	Garantías: Ley de Defensa del Consumidor (Ley N°24.240)	71
12.4.4.	Daños: Responsabilidad Civil y Ley de Seguros (Ley N°17.418)	71
12.4.5.	Grado de protección IP66 (Norma IEC 60529)	72
12.4.6.	Certificación obligatoria (Resolución 171/16)	72
13.	Estudios de Confiabilidad	73
13.1.	Diagrama de confiabilidad (Hardware)	73
13.2.	Confiabilidad de hardware	74
13.2.1.	Módulos a analizar	74
13.3.	Confiabilidad de software	78
13.3.1.	Modelo de estimación	78
14.	Ingeniería en detalle	83

14.1.	Descripción general de producto	83
14.2.	Hardware	83
14.2.1.	Diagrama en bloques	83
14.2.2.	Motores	83
14.2.2.1.	Motores de movimiento	83
14.2.2.2.	Control de motores de movimiento	87
14.2.2.3.	Motor de corte	88
14.2.3.	Ruedas	89
14.2.3.1.	Ruedas traseras	89
14.2.3.2.	Rueda delantera	90
14.2.4.	Diseño mecánico	90
14.2.4.1.	Chasis	90
14.2.4.2.	Adaptador motor - rueda	91
14.2.4.3.	Adaptador motor - chasis	93
14.2.4.4.	Altura regulable	95
14.2.4.5.	Carcasa	98
14.2.5.	Etapa de Potencia	99
14.2.5.1.	Consumo eléctrico	99
14.2.5.2.	Baterías	102
14.2.5.3.	Detección de estado de baterías	103
14.2.5.4.	Etapa de distribución de potencia	104
14.2.5.5.	Etapa de potencia: motores	106
14.2.5.5.1.	Motores de movimiento	106
14.2.5.5.2.	Motor de corte	107
14.2.6.	Detección de objetos	108
14.2.6.1.	Módulo Infrarrojo	108
14.2.6.2.	Módulo fin de carrera	112
14.2.6.3.	Unidad de procesamiento	113
14.2.7.	GNSS	116
14.2.7.1.	Receptores GNSS	116
14.2.7.2.	Antena	116
14.2.7.3.	Conexiones	117
14.2.7.4.	Diagrama general de comunicación	117
14.2.8.	Unidad de medición inercial (IMU)	118

14.2.9.	Módulo central	118
14.2.10.	Base	119
14.3.	Software	120
14.3.1.	Algoritmo para el módulo de posición	120
14.3.2.	Algoritmo de posición para la base	121
14.3.3.	RTK	121
14.3.4.	Algoritmo de medición de orientación relativa	122
14.3.5.	Medición de velocidad de motores de movimiento	125
14.3.6.	Control de motor de corte	126
14.3.7.	Control de motores por orientación	127
14.3.8.	Módulo central	130
14.3.8.1.	Modo Idle	132
14.3.8.2.	Modo Manual	133
14.3.8.2.1.	Grabado de perímetro	134
14.3.8.3.	Modo Autónomo	135
14.3.8.3.1.	Evasión de objetos	136
14.3.8.3.2.	Generación de recorrido	137
14.3.8.3.3.	Orientación inicial absoluta	141
14.3.8.3.4.	Sistema de navegación	142
14.3.8.3.5.	Control de posición y generación de “paredes”	142
14.3.8.3.6.	Principales funciones	144
14.3.9.	Software del módulo objetos	145
14.3.9.1.	Programación de microcontroladores	145
14.3.9.2.	Transferencia de datos al módulo central	146
14.3.10.	Conectividad y control del dispositivo mediante la Web App	146
14.3.10.1.	Conectividad entre sistemas	146
14.3.10.2.	MQTT Broker IoT	147
14.3.10.2.1.	Uso del protocolo MQTT	147
14.3.10.3.	Cortadora de césped como dispositivo IoT	148
14.3.10.4.	Desarrollo de la web app	150
15.	Construcción del Prototipo	153
15.1.	Prototipo a escala	153
15.2.	Dimensiones y peso	154
15.3.	Alimentación y potencia	154

15.4.	Sensores y microcontroladores	154
15.4.1.	Sensores de detección de objetos	155
15.5.	Motores	156
16.	Validación del Prototipo	157
16.1.	Simulación de recorrido simple	157
16.1.1.	Simulación de evasión de objetos	158
16.1.2.	Simulación híbrida	159
16.2.	Validaciones de especificaciones	160
16.2.1.	Conectividad con la web app y wifi	160
16.2.2.	Precisión en el posicionamiento	160
16.2.3.	Evasión de objetos	163
16.2.4.	Modo Manual	165
16.2.5.	Recorrido y corte autónomo	167
16.2.6.	Elevación del suelo	169
17.	Conclusiones	170
18.	Anexo	171
18.1.	Proyecciones de ventas	171
18.2.	Esquemáticos	172
18.3.	Algoritmo de detección y evasión de objetos: The Bubble Rebound Algorithm	175

3. Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de encuestados, total de respuestas	21
Figura 2 Diagrama de encuestados, como realiza el corte	22
Figura 3 Diagrama de encuestados, noción de existencia	22
Figura 4 Diagrama de encuestados, conectividad wifi	22
Figura 5 Diagrama de encuestados, tamaño de jardín	23
Figura 6 Diagrama de encuestados, interés en automatizar el proceso	23
Figura 7 Diagrama de encuestados, influencia del precio	24
Figura 8 Diagrama de encuestados, consideración personal en el precio del producto	24
Figura 9 Diagrama de encuestados, tamaño del producto.....	25
Figura 10 Diagrama de encuestados, peso del producto	25
Figura 11 Diagrama de encuestados, altura del corte regulable	25
Figura 12 Diagrama de encuestados, instalación	26
Figura 13 Diagrama de encuestados, importancia de la web app y modo manual.....	26
Figura 14 Diagrama de encuestados, importancia de la web app y modo manual.....	27
Figura 15 Diagrama Funcional de Interfaces	30
Figura 16 Banco de Pruebas A	39
Figura 17 Banco de pruebas B.....	40
Figura 18 Banco de pruebas C.....	40
Figura 19 Diagrama de dependencias del producto	53
Figura 20 Diagrama Modular	54
Figura 21 DFMA.....	61
Figura 22 Diagrama de PERT	62
Figura 23 Gantt (primera parte).....	63
Figura 24 Gantt (segunda parte).....	64
Figura 25 Flujo de ingresos acumulado para los primeros 10 años.....	69
Figura 26 : Diagrama de confiabilidad	73
Figura 27 Confiabilidad en función del tiempo de uso..	78
Figura 28 Errores detectados semana a semana, y su línea de tendencia	80
Figura 29 Errores acumulados, corregidos y residuales	80
Figura 30 Confiabilidad de software	81
Figura 31 Diagrama en bloques del sistema completo.....	83
Figura 32 Modelado de un motor DC	87
Figura 33 Etapa de acondicionamiento de señal de salida del sensor de corriente.....	88
Figura 34 Chasis	91
Figura 35 Adaptador motor-rueda.....	92
Figura 36 Esfuerzos sobre el adaptador.....	93
Figura 37 Vista frontal de los motores a utilizar	93
Figura 38 Adaptador motor - chasis.....	94
Figura 39 Esfuerzos de desgarro en el adaptador motor - chasis.....	95
Figura 40 Plataforma para la regulación de altura de corte	96
Figura 41 Esfuerzos de desgarro	98
Figura 42 Carcasa diseñada para el producto final	98

Figura 43 Diagrama en bloques de la etapa de potencia	99
Figura 44 Consumo de los motores vs superposición en el corte	102
Figura 45 Conexión del detector de estado de baterías	104
Figura 46 Topología de etapa de distribución de potencia	105
Figura 47 Conexión del driver a utilizar	106
Figura 48 Capacitores de salida	107
Figura 49 Controlador del motor de corte a utilizar	107
Figura 50 Diagrama en bloques del módulo detección de objetos	108
Figura 51 Disposición de los módulos IR.....	109
Figura 52 Cálculo y distribución de los módulos IR.....	109
Figura 53 Curva característica por el material cobertor de los módulos IR.....	110
Figura 54 Disposición de los diodos transmisores y receptores	111
Figura 55 Esquemático transmisor	111
Figura 56 Esquemático receptor.....	111
Figura 57 Módulo comparador de señales IR	112
Figura 58 Datos del LM339 extraídos de la hoja de datos.....	112
Figura 59 Disposición de los interruptores fin de carrera.....	113
Figura 60 Esquemático del fin de carreras.....	113
Figura 61 Conexiones con el microcontrolador	114
Figura 62 Datos del ATmega extraídos de su hoja de datos.....	114
Figura 63 Conexiones del multiplexor del módulo de detección de objetos	115
Figura 64 Datos obtenidos de la hoja de datos del fabricante	115
Figura 65 Diagrama general de conexión del posicionamiento.....	117
Figura 66 Módulo MPU6050 a utilizar	118
Figura 67 Diagrama en bloques del módulo central.....	119
Figura 68 Diagrama en bloques de los módulos de la base.....	119
Figura 69 Diagrama en bloques del software del módulo de posición.....	120
Figura 70 Diagrama en bloques del software de la base para la posición.....	121
Figura 71 Diagrama de flujos del driver OrDRV	123
Figura 72 Diagrama en bloques del sistema de control utilizado.....	125
Figura 73 Diagrama en bloques del control del motor de corte.....	127
Figura 74 Diagrama en bloques del sistema de control de orientación de motores.....	127
Figura 75 Máquinas de estado.....	131
Figura 76 Diagramas en bloques de los drivers utilizados	132
Figura 77 Diagrama de estados y eventos	133
Figura 78 Diagramas de estados y flujo del modo manual.....	133
Figura 79 Diagrama de estados del modo autónomo	135
Figura 80 Algoritmo de evasión	137
Figura 81 Representación de los distintos modos de corte seleccionables	138
Figura 82 Imagen formada a partir de la normalización de los puntos del perímetro	138
Figura 83 Perímetro obtenido luego de realizar la dilatación	139
Figura 84 Áreas obtenidas al introducir el contorno en la función fillConvexPoly	139
Figura 85 Área de interés aislada.....	140
Figura 86 Grilla de puntos para el recorrido de la cortadora	140

Figura 87 Variables para el cálculo de orientación absoluta	141
Figura 88 Paredes de contención.....	143
Figura 89 Detalle de función Aut_get_tgt_degrees.....	144
Figura 90 Detalle de función Aut_update_pos	144
Figura 91 Detalle de función Aut_build_wall.....	144
Figura 92 Detalle de función Aut_predict_orient	145
Figura 93 Diagrama en bloques del software de detección de objetos	146
Figura 94 Esquema representativo de los datos que se transmiten por I2C.....	146
Figura 95 Diagrama en bloques del software de la conectividad entre sistemas	147
Figura 96 Diagrama en bloques del software de la solicitud de datos del recorrido autónomo	149
Figura 97 Web app desarrollada y marcas de las características principales.....	152
Figura 98 Detalles de la web App desarrollada.....	153
Figura 99 Prototipo a escala	153
Figura 100 Módulos infrarrojos del prototipo.	155
Figura 101 Módulos fin de carrera del prototipo	156
Figura 102 Motores del prototipo	156
Figura 103 Simulación S-AUT-02.....	157
Figura 104 Simulación S-Obj-01.....	158
Figura 105 Simulación S-HIB-01	159
Figura 106 Validación T-AUT-02-3	161
Figura 107 Error de posición en T-AUT-02-3.....	162
Figura 108 Alerta indicada en la web app.....	163
Figura 109 Validación T-AUT--04-1	164
Figura 110 Validación T-MAN-01-1	165
Figura 111 Error de posición en T-MAN-01-1	166
Figura 112 Perímetro grabado en la web app	166
Figura 113 Validación T-AUT-01.....	167
Figura 114 Recorrido grabado en la web app.....	168
Figura 115 Alerta de equipo elevado	169
Figura 116 Ventas del modelo AutoMower de Husqvarna.....	171
Figura 117. Módulo Central para el Producto Final.....	172
Figura 118 Módulo Central implementado en el prototipo	173
Figura 119 Esquemático del multiplexor	173
Figura 120 Conexiones del microcontrolador del módulo detección de objetos.....	174
Figura 121 Módulo con el comparado para las señales recibidas de los infrarrojos.....	174
Figura 122 Conexión del receptor GNSS a la antena activa y el módulo posición.....	175
Figura 123 Esquemático para la conexión del receptor GNSS al conector USB.	175
Figura 124. Burbuja generada por los sensores.....	176
Figura 125. Histograma que muestran algunos objetos presentes.	176

4. Lista de Tablas

Tabla 1: Acrónimos.....	14
Tabla 2 Definiciones	17
Tabla 3 Leyenda de uso en especificaciones.....	30
Tabla 4 Especificaciones Funcionales del Dispositivo	31
Tabla 5 Especificaciones Funcionales de la Instalación	31
Tabla 6 Especificaciones Funcionales de la Aplicación	31
Tabla 7 Especificaciones de Interfaz de Ambiente.....	32
Tabla 8 Especificaciones de Interfaz Eléctrica.....	32
Tabla 9 Especificaciones de Interfaz de Data	33
Tabla 10 Especificaciones de Performance.....	34
Tabla 11 Especificaciones de Operación	35
Tabla 12 Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética	35
Tabla 13 Especificaciones de Almacenamiento	36
Tabla 14 Especificaciones de Dimensión y Peso	36
Tabla 15 Especificaciones de costos	36
Tabla 16 Especificaciones de Confiabilidad.....	37
Tabla 17 Especificaciones de Mantenibilidad	37
Tabla 18 Especificaciones de Seguridad.....	38
Tabla 19 Tests de dimensiones	41
Tabla 20 Tests de comunicación	42
Tabla 21 Tests de operación manual	44
Tabla 22 Tests de autonomía	47
Tabla 23 Simulación de recorrido	48
Tabla 24 Simulación de evasión de objetos	49
Tabla 25 Simulación híbrida	49
Tabla 26 Matriz de trazabilidad de validación	52
Tabla 27 Comparación de unidades de procesamiento.....	55
Tabla 28 Comparación de tecnologías para detección de obstáculos.....	58
Tabla 29 Comparación de tecnologías de motores.....	59
Tabla 30 Comparación de las tecnologías de sensores de corriente.....	60
Tabla 31 Datos del Censo Nacional 2010.....	65
Tabla 32 Datos estimados 2020	65
Tabla 33 Hogares dentro del rango ABC-1 y C2.	66
Tabla 34 Detalle de costos de una unidad	66
Tabla 35 Costos de instalaciones estimadas.....	67
Tabla 36 Costos anuales de personal estimados	67
Tabla 37 Flujo de ingreso para los primeros 10 años.....	68
Tabla 38 Flujo acumulado de fondos para los primeros 10 años	68
Tabla 39 Confiabilidad de la etapa de potencia – fuente Buck.....	75
Tabla 40 Confiabilidad de la etapa de potencia - regulador 5V.....	75
Tabla 41 Confiabilidad de la etapa de mecánica.....	75
Tabla 42 Confiabilidad de la etapa de detección de objetos – sensores IR A.....	75

Tabla 43	Confiabilidad de la etapa de detección de objetos - sensores IR B.....	76
Tabla 44	Confiabilidad de la etapa de detección de objetos - fin de carrera	76
Tabla 45	Confiabilidad de la etapa de posición	76
Tabla 46	Confiabilidad del módulo central	76
Tabla 47	Detección de errores	79
Tabla 48	Variables utilizadas para la selección de los motores	84
Tabla 49	Características del motor a utilizar.....	86
Tabla 50	Consumos de corriente para los distintos tipos de corte.....	101
Tabla 51	Consumos estimados para una superposición del 10%	102
Tabla 52	Peor caso de consumos medios	105
Tabla 53	Datos del u-blox NEO-M8T	116
Tabla 54	Datos obtenidos de la hoja de datos del fabricante.....	118
Tabla 55	Parámetros más significativos de RTK.....	122
Tabla 56	Detalles de la función MPU_initialize.....	124
Tabla 57	Detalles de la función MPU_setGyroOffset.....	124
Tabla 58	Detalles de la función MPU_getYawPitchRoll	124
Tabla 59	Descripción de la función Motor_move	128
Tabla 60	Descripción de la función Motor_rotate	129
Tabla 61	Descripción de la función Motor_stop.....	129
Tabla 62	Descripción de la función Motor_control	130
Tabla 63	Ejemplificación de los bloques transmitidos	149
Tabla 64	Subrutinas de la conectividad entre la web app y el robot.....	150
Tabla 65	Errores en cada repetición	162
Tabla 66	Tasa de crecimiento los primeros 10 años	172

5. Índice de Acrónimos

Acrónimo	Descripción
AC	Corriente Alterna (Alternate Current)
ADC	Conversor Analógico a Digital
AMBA	Área Metropolitana de Buenos Aires
CABA	Ciudad Autónoma de Buenos Aires
DC	Corriente Continua (Direct Current)
DGPS	GPS Diferencial (Differential GPS)
EMC	Compatibilidad Electromagnética (ElectroMagnetic Compatibility)
EBITDA	Ingresos antes de intereses, impuestos y amortización (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization)
FC	Fin de Carrera (sensor)
GBA	Gran Buenos Aires
GND	Tierra eléctrica (Ground)
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
HW	Hardware
IEC	Comisión internacional eléctrica (International Electrotechnical Commission)
IIBB	Ingresos Brutos
IMU	Unidad de medición inercial (Inertial Measurement Unit)
IOT	Internet de las cosas (Internet of Things)
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
INPI	Instituto Nacional de la Propiedad Industrial
IR	Infrarrojo

IVA	Impuesto al Valor Agregado
LED	Diodo Emisor de Luz (Light Emitting Diode)
MUX	Multiplexor
OAA	Organismo Argentino de Acreditación
PCB	Circuito Impreso (Printed Circuit Board)
PID	Control Proporcional, Integrativo y Derivativo (Proportional-Integrative-Derivative)
QoS	Calidad de Servicio (QoS)
RPM	Revoluciones Por Minuto
RTK	Navegación Cinética Satelital en Tiempo Real (Real Time Kinematic)
RX	Receptor
SAS	Sociedad Anónima Simplificada
SW	Software
TCP	Protocolo de control de transmisión (Transfer Control Protocol)
TIR	Tasa Interna de Retorno
TX	Transmisor
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
USB	Bus Universal en Serie (Universal Serial Bus)
VAN	Valor Actual Neto
VCC	Tensión de alimentación
VFH	Vector Field Histogram

Tabla 1: Acrónimos

6. Índice de Definiciones

	Definiciones
ABC-1	La sociedad en argentina puede segmentarse y apilarse en una pirámide socio económico siendo ABC-1 la clase más alta que conforma el tope.
API KEY	Es una clave o código para autenticarse ante una interfaz de una aplicación para acceder un servicio.
Backend	Todos los procesos internos que realiza el software que el usuario no interactúa.
Broker	El sistema MQTT funciona gracias a la incorporación de un componente esencial llamado MQTT Broker. Éste sería un intermediario que recibe los mensajes publicados por los publishers, estos son filtrados según el tópico y son enviados a aquellos subscribers o dispositivos suscritos al tópico.
Brushless	Motores eléctricos que no emplean escobillas para cambiar la polaridad del rotor, a diferencia de los motores DC convencionales.
Cloud	La nube (Cloud), conocida también como servicios en la nube, es un paradigma que permite ofrecer servicios de computación e incluyendo el almacenamiento de datos a través de una red, que usualmente es Internet.
C2	La sociedad en argentina puede segmentarse y apilarse en una pirámide socio económico siendo C2 el nivel medio alto que está en segundo lugar desde el tope.
Driver	Circuito o programa utilizado para controlar un circuito, componente o equipo específico.
Duty Cycle	Es el porcentaje de tiempo en el cual una señal se encuentra en estado alto, con respecto a un período de tiempo completo.
Encoder	Sensor de velocidad angular normalmente utilizado para obtener las RPM de un motor.
Framework	Un conjunto de programas, bibliotecas, herramientas, para facilitar, ayudar a desarrollar y combinar distintos componentes de un proyecto.
Frontend	La interfaz visible donde un usuario interactúa con el software.

Microcontrolador	Un microcontrolador difiere de un microprocesador, debido a que es más fácil convertirlo en una computadora en funcionamiento, con un mínimo de circuitos integrados externos de apoyo. La idea es que el circuito integrado se coloque en el dispositivo, enganchado a la fuente de energía y de información que necesite. Un microprocesador tradicional no permitiría hacer esto, ya que espera que todas estas tareas sean manejadas por otros chips. Hay que agregarle los módulos de entrada y salida (puertos) y la memoria para almacenamiento de información.
Microprocesador	Es el circuito integrado central más complejo de un sistema informático; a modo de ilustración, se le suele llamar por analogía el «cerebro» de una computadora. Se encarga de ejecutar los programas, desde el sistema operativo hasta las aplicaciones de usuario; sólo ejecuta instrucciones programadas el lenguaje de bajo nivel, realizando operaciones aritméticas y lógicas simples, tales como sumar, restar, multiplicar, dividir, las lógicas binarias y accesos a memoria. Puede contener una o más unidades centrales de procesamiento (CPU) constituidas, esencialmente, por registros, una unidad de control, una unidad aritmético lógica (ALU) y una unidad de punto flotante (llamada antiguamente «coprocesador matemático»).
Overlap	Superposición en el proceso de corte. Un overlap del 0% indica que los puntos se visiten una única vez, y un overlap del 100% provoca que todos los puntos se corten 2 veces.
Payback	Tiempo que tarda un inversor en recuperar el dinero inicial invertido (Tiempo de retorno de la inversión).
Publisher	Aquellos dispositivos que publican un mensaje a un tópico en particular.
Subscribers	Son dispositivos que se suscriben a un tópico en particular y los mensajes transmitidos en ese tópico solo podrán ser recibidos por estos.
Token	Es una clave que contiene las credenciales para autenticarse ante una interfaz de una aplicación para acceder un servicio.
Tópicos	Estos son canales virtuales que conectan a un publisher a un subscriber sin la necesidad de conocer alguna información entre ellos.
Overhead	En los protocolos de comunicación para garantizar que los datos transmitidos lleguen al destino se le agrega información adicional. Dependiendo de la robustez del protocolo esta información puede ser muy amplia conteniendo información que para ciertas aplicaciones puede ser innecesario.

Visión Artificial	Visión Artificial es una disciplina que incluye diversos métodos para adquirir, procesar y analizar imágenes para producir información. Esta información podrá ser usada para resolver problemas mediante el uso de algoritmos o alimentar sistemas de inteligencia artificial.
Web App	Este tipo de aplicación se carga en el servidor web y corre desde el navegador por lo que no requiere de una instalación a diferencia de una aplicación nativa. Estas aplicaciones pueden correr en distintos sistemas operativos y además es posible crear un acceso directo o incluso correr la aplicación desde el interior de una aplicación nativa.

Tabla 2 Definiciones

7. Resumen

En este informe se diseña y desarrolla una solución a una problemática planteada que existe a la hora de cortar el césped en los jardines hogareños: el desarrollo de una cortadora autónoma de césped.

En este análisis se comparan productos existentes en el mercado local para identificar ventajas y desventajas. A partir de este análisis se encontraron alternativas innovadoras para reducir al mínimo la instalación por parte del usuario y el costo evitando la intervención de un agente especializado para dicha instalación; como sucede en otros productos similares.

En primer lugar, se analizarán requerimientos y especificaciones que surgen a través de encuestas públicas que serán consideradas para este diseño. Luego se analizará la factibilidad del proyecto y mediante el análisis y uso de distintas tecnologías se desarrolla el diseño.

Luego se construye un prototipo a escala y una web app con su software correspondiente para evaluar los requerimientos y especificaciones de interés. Es importante destacar que el producto deberá ser implementado siempre que sea posible con materiales y componentes de grado comercial o listos para usar (COTS).

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos usando distintos bancos de pruebas para la validación mediante el prototipo a escala desarrollado. Con los resultados obtenidos se validó de forma exitosa el análisis, los requerimientos y especificaciones relevantes.

8. Introducción

8.1. Antecedentes

A mediados del siglo XIX se inventa la primera cortadora de césped, una mejora sustancial al clásico uso de utilizar ganado o guadaña para mantener el césped corto. Desde aquel entonces, se ha mejorado el diseño de las cortadoras para hacer que la labor de cortar el mismo sea cada vez menos tediosa. En tiempos modernos, la tecnología estándar utilizada son las cortadoras manuales eléctricas, donde si bien se facilita el trabajo con respecto a las guadañas, su uso sigue siendo un proceso manual y cansador.

Actualmente en los hogares de familia el precio ha pasado a ser un factor importante en la selección de una cortadora, sin embargo, la facilidad de uso de los distintos productos es inversa a su costo, siendo la tendencia que soluciones más automatizadas y con mayor facilidad de uso y ahorro de tiempo sean, asimismo, las más caras.

8.2. Contexto del Proyecto

De las soluciones presentadas anteriormente, en el extremo de las más automatizadas se observa que todos los productos en el mercado argentino son de origen extranjero. Debido a la situación económica de la Argentina respecto a los países de los cuales se importan las soluciones más autónomas, el precio relativo aumenta substancialmente. Es entonces que este proyecto nace de la creencia de que, con las tecnologías disponibles, es posible hacer un producto autónomo con una gran facilidad de uso a un precio menor en comparación a las soluciones autónomas ya existentes.

A su vez cabe destacar que todas las soluciones nombradas previamente cuentan con un proceso de instalación que requiere la presencia de un empleado de sus respectivos distribuidores. El proyecto busca eliminar esta dependencia simplificando el proceso de instalación y configuración.

9. Objetivos

9.1. Finalidad del proyecto

La finalidad de este proyecto es buscar una solución automática al trabajo de cortar manualmente el césped en los hogares. Se busca diseñar una cortadora de césped autónoma para la cual no se requiera instalación y cuyo precio sea más económico en comparación con los productos importados existentes en el mercado argentino.

9.2. Planteamiento del problema a resolver

Este proyecto debe implicar un diseño innovador con respecto a las demás cortadoras de césped autónomas existentes, para ofrecer un mejor precio a los clientes y no requerir instalación. Por este motivo, el problema consiste en desarrollar un diseño en base a componentes económicos y accesibles del mercado argentino sin comprometer la funcionalidad propuesta para el equipo.

9.3. Alcance

Se buscan alcanzar principalmente jardines particulares, considerando la viabilidad tecnológica y sobre todo financiera del producto. Se elaborará sólo un prototipo no comercial, el cual actuará de modelo para la verificación del diseño, cumpliendo de manera parcial los requerimientos del producto final. Se analizarán normativas de seguridad en torno a la herramienta de corte, pero estas no se contemplarán en el prototipo.

El jardín y el clima donde opere la cortadora autónoma tendrá que cumplir ciertas pautas para el correcto funcionamiento del producto. Por ejemplo; no debe funcionar bajo la lluvia ya que el corte del césped en estas condiciones puede arrancar la hierba desde la raíz, o el césped no puede superar cierta altura, por lo que el usuario deberá contemplar un primer corte con una cortadora tradicional o por contratación de un servicio, entre otros.

Se desarrollará una web app prototipo donde el usuario tendrá información útil y podrá seleccionar entre el modo automático y manual del dispositivo. Al igual que la cortadora, este prototipo tendrá limitaciones y no cumplirá todos los requerimientos del producto final, solo aquellos necesarios para poder validar el funcionamiento del sistema.

10. Definición de Producto

10.1. Requerimientos de Cliente

10.1.1. Relevamiento de Datos

Se realizó una encuesta abierta a diversas personas a través de internet, donde la primera pregunta filtraba a toda aquella que no tenía un jardín (ver Figura 1), de modo que la información obtenida sea solo de aquellas personas que puedan convertirse en eventuales clientes. Teniendo una referencia tácita de cuál será el valor de los costos del producto, se optó por difundir la encuesta a personas de clase social ABC-1 y C2. Aun así, se contemplan los casos de que la encuesta haya sido resuelta por otras clases sociales; resultado de la difusión por parte de referentes.

Luego de un período de 2 semanas de libre divulgación de la encuesta se obtuvieron 202 respuestas, de las cuales un porcentaje mayor al 80% poseían jardín. Esto fue considerado un tamaño muestral suficientemente grande para realizar un análisis de requerimientos.

A continuación, se dispondrán de algunas preguntas relevantes realizadas en la encuesta.

¿Usted tiene un jardín/patio?

202 responses

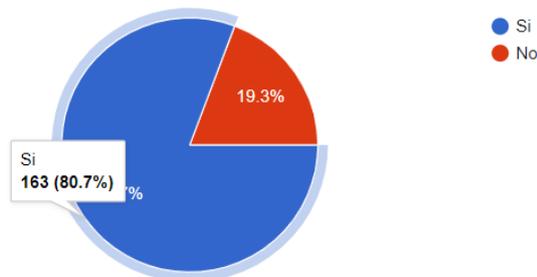


Figura 1 Diagrama de encuestados, total de respuestas

Ya que existe la posibilidad de que sea común tener el proceso automatizado se partió de una pregunta simple, ¿quién corta el césped en su jardín? Por los resultados obtenidos, el porcentaje de los propietarios de un robot autónomo y la noción de que éstos existen es tan bajo que puede haber un mercado potencial no explorado, ya sea un producto particular para hogares, empresas o por contratación de un servicio.

¿Quién corta el pasto en su jardín?

163 responses

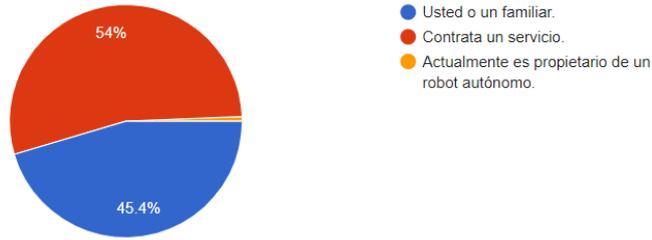


Figura 2 Diagrama de encuestados, como realiza el corte

¿Conoce alguna cortadora de pasto autónoma?

202 responses

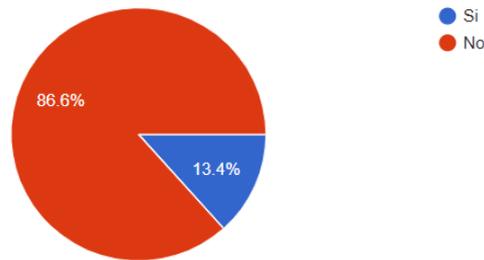


Figura 3 Diagrama de encuestados, noción de existencia

Uno de los principales problemas al desarrollar este producto es el tipo de conectividad que tendrá con el usuario. Se obtuvo que un 78.5% de los encuestados posee conectividad wifi en su jardín.

¿Posee señal de Wi-Fi en su jardín?

163 responses

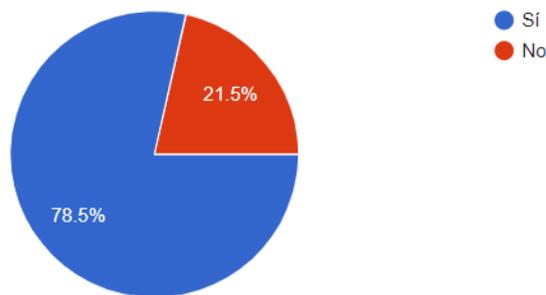


Figura 4 Diagrama de encuestados, conectividad wifi

Uno de los aspectos más importantes a analizar a la hora de diseñar una cortadora de césped autónoma es el tamaño del jardín del cliente, ya que hay muchos requerimientos asociados a esta variable, entre ellos el tiempo total de corte, la capacidad de las baterías, la velocidad máxima de la cortadora, entre otros. Se obtuvo como resultado de la encuesta que el 50% de los posibles clientes

tienen 100 m2 o menos de jardín, lo que se considerará como el objetivo mínimo de autonomía sobre el cual se basará el diseño.

¿Que tamaño aproximado tiene su jardín?

163 responses

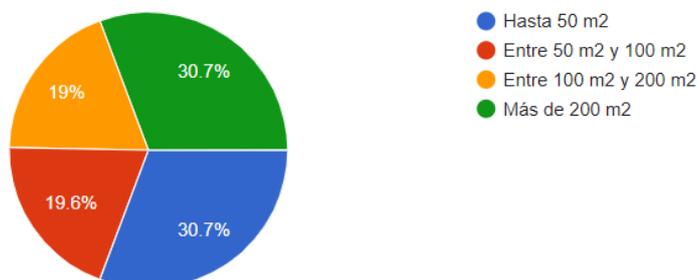


Figura 5 Diagrama de encuestados, tamaño de jardín

Como se mencionó anteriormente, una de las propuestas de valor que busca lograr el diseño de esta cortadora es que el costo final del producto sea menor al de las alternativas comerciales actuales del mercado. Sin embargo, el valor de las cortadoras autónomas importadas no es suficiente para establecer una cota superior para el costo final del producto; es necesario realizar un análisis más detallado con el fin de obtener el valor máximo que el mercado nacional esté dispuesto a pagar para este producto.

Para obtener la información mencionada previamente se plantearon las siguientes preguntas, dando como resultado que, dentro los usuarios interesados en tener un proceso autónomo, un 40.7% están dispuestos a pagar U\$S 700 y otro 32% hasta U\$S 1000 por lo cual el precio del producto deberá estar en este intervalo, buscando un porcentaje de interesados cercano al 60%.

¿Le gustaría que el proceso de corte sea autónomo?

163 responses

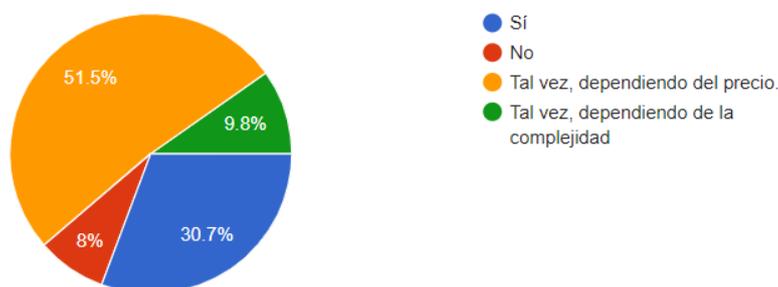


Figura 6 Diagrama de encuestados, interés en automatizar el proceso

Yendo de menor a mayor (1 siendo nada), ¿cuanto influiría el precio en realizar una compra de un producto de este tipo?

150 responses

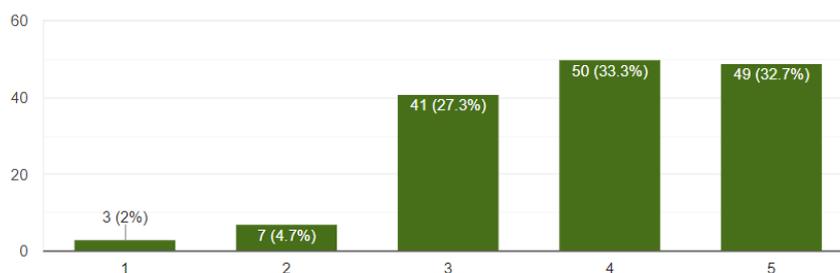


Figura 7 Diagrama de encuestados, influencia del precio

Actualmente, los precios de productos similares en el país se encuentran entre US\$ 1.100 y US\$ 3.500. ¿Que precio considera razonable para una cortadora autónoma?

150 responses

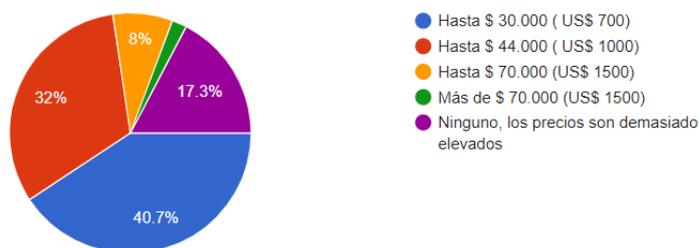


Figura 8 Diagrama de encuestados, consideración personal en el precio del producto

Se hicieron preguntas sobre cualidades físicas que un usuario esperaría de una cortadora de estas prestaciones. Se obtuvo que un 44% de los encuestados considera que la envolvente de la cortadora debe ser menor o igual a 60cm x 60cm y un 27.3% que no lo considera relevante por lo cual utilizando dichas dimensiones como base del diseño se abarcaría un 71% de los encuestados.

Por los resultados obtenidos en el peso total del dispositivo, éste tendrá que ser como máximo 15 kg, obteniendo un porcentaje de aceptación de 56.7%. Por otro lado, debido a que las cortadoras de césped tradicionales tienen dos o más niveles seleccionables para la altura del corte, se deberá implementar un sistema de regulación de altura, ya que más del 65% de los encuestados lo consideran importante y una característica necesaria a mantener.

¿Qué tamaño aproximado considera apropiado para la cortadora autónoma?

150 respuestas

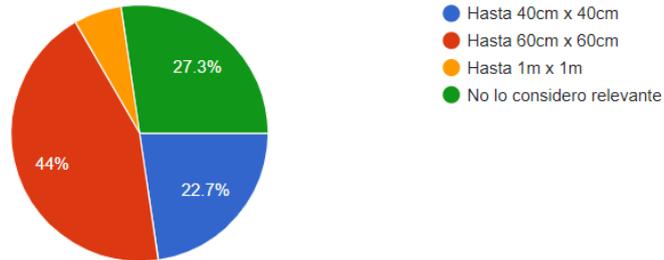


Figura 9 Diagrama de encuestados, tamaño del producto

¿Qué peso aproximado considera apropiado?

150 respuestas

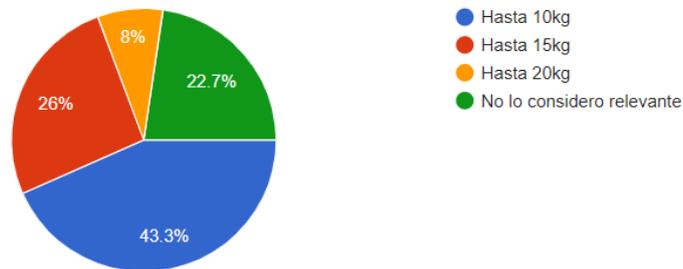


Figura 10 Diagrama de encuestados, peso del producto

¿Qué opinión tiene sobre la altura de corte?

150 respuestas

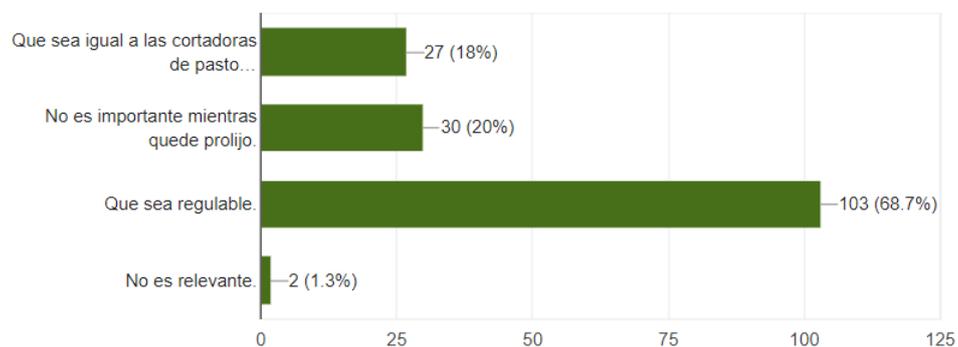


Figura 11 Diagrama de encuestados, altura del corte regulable

Los productos internacionales requieren de una delimitación física del perímetro, lo que implica una instalación por personal especializado con costos adicionales. De aquí se obtiene que gran porcentaje considera importante realizar la instalación por cuenta propia.

Siendo 1 irrelevante y 5 muy importante, ¿que le parece poder realizar la instalación usted mismo, sin necesidad de personal especializado?

150 respuestas

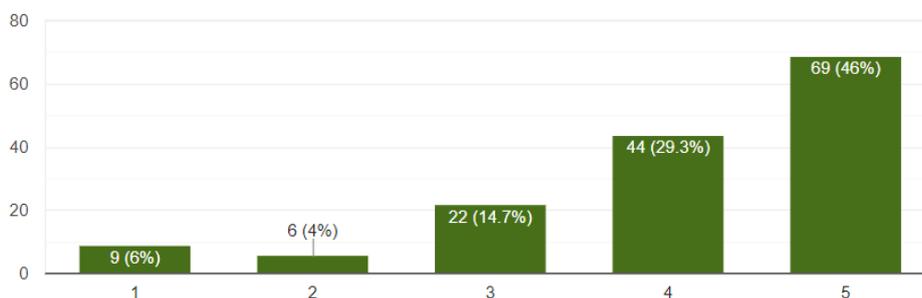


Figura 12 Diagrama de encuestados, instalación

Se desarrollará una web app para las configuraciones del dispositivo, el delimitador inicial del perímetro del jardín y aquellas variables relevantes (como por ejemplo la batería o el porcentaje completo del proceso). Sabiendo que el proceso inicial de marcar el perímetro del jardín se hará manualmente, se preguntó si el posible usuario estaría dispuesto a tener un modo manual y hacer el corte por su cuenta. Se obtuvo un 56% que prefieren el modo autónomo, pero si tienen una opción de modo manual lo usarían y un 71.3% considera importante el control con una web app. Por este motivo, se desarrollará un modo manual controlable desde de la web app y no a través de un dispositivo físico externo.

¿Estaría dispuesto a controlar el dispositivo manualmente con un control remoto?

150 respuestas

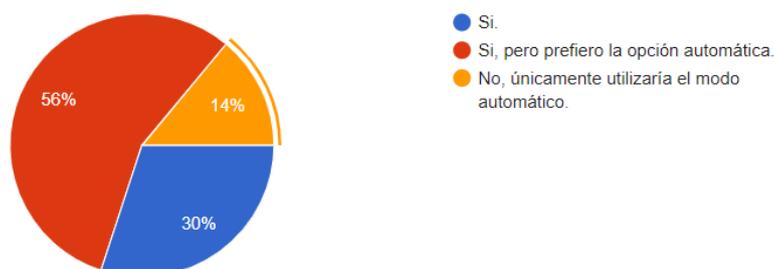


Figura 13 Diagrama de encuestados, importancia de la web app y modo manual

¿Considera importante controlar el dispositivo mediante una aplicación en su celular?

150 responses

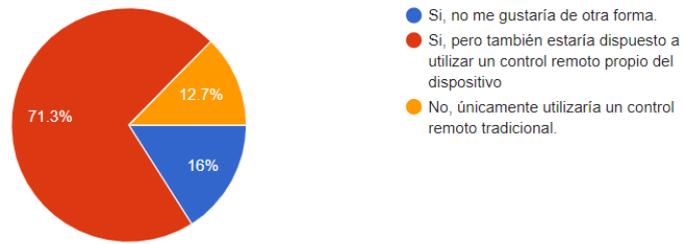
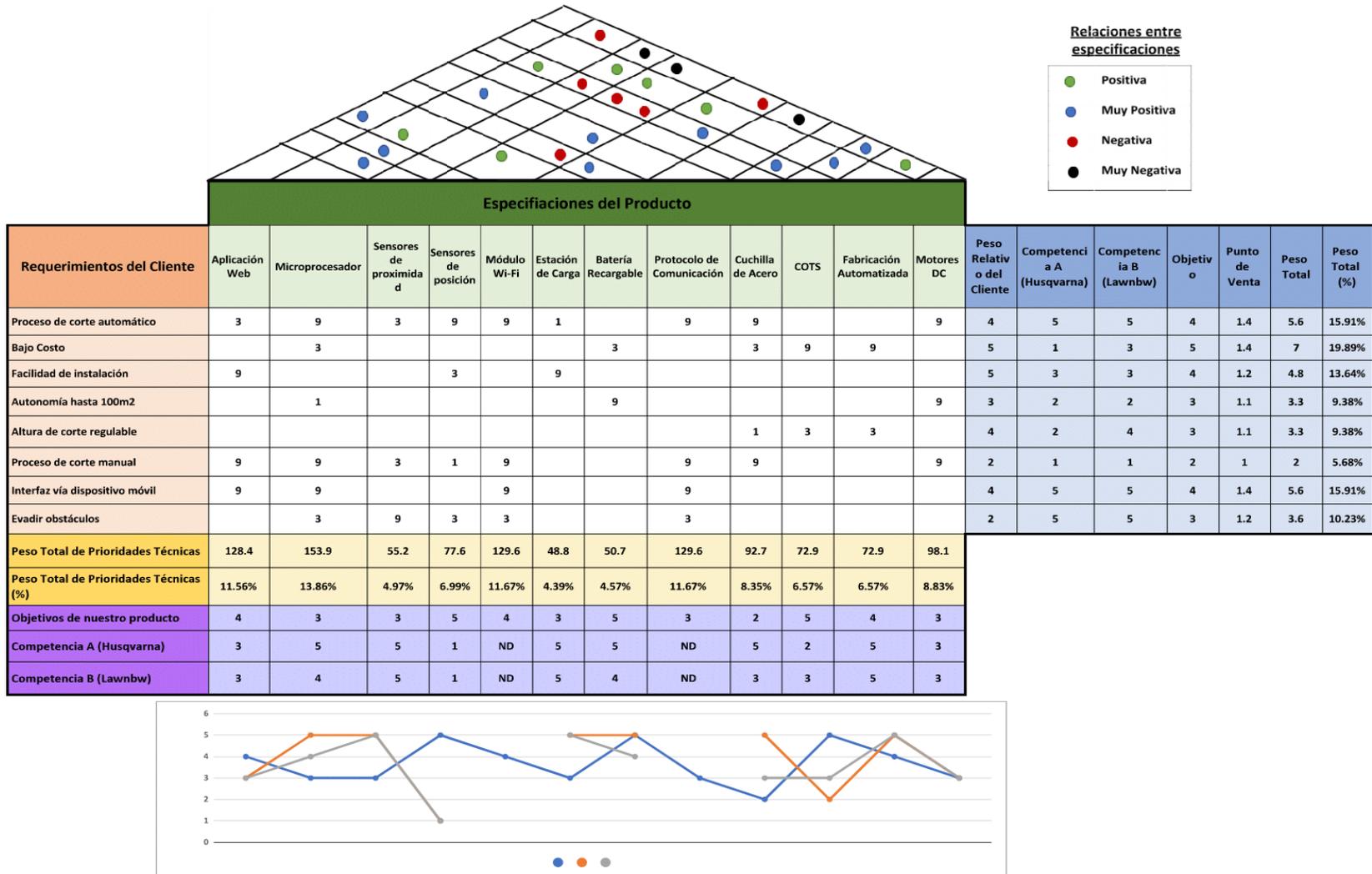


Figura 14 Diagrama de encuestados, importancia de la web app y modo manual

10.1.2. Casa de Calidad



10.1.3. Requerimientos finales para trazabilidad

ID	Descripción	Origen
REQ-01	El producto deberá medir menos de 60 cm de ancho y 60 cm de largo.	Encuesta
REQ-02	El producto deberá pesar menos de 15 kg.	Encuesta
REQ-03	El producto deberá tener altura de corte regulable.	Encuesta
REQ-04	El producto deberá tener una autonomía para trabajar en jardines de hasta 100 m2.	Encuesta
REQ-05	El producto deberá tener la opción de ser controlado manualmente.	Encuesta
REQ-06	La instalación del producto debe poder ser realizada por el usuario.	Encuesta
REQ-07	El costo del producto deberá ser igual o menor a US \$1000.	Encuesta
REQ-08	El producto deberá poder evadir obstáculos que encuentre durante el proceso de corte autónomo.	Encuesta
REQ-09	El producto deberá contar con una web app mediante la cual se pueda controlar, configurar y diagnosticar el funcionamiento de este.	Encuesta
REQ-10	El producto debe cumplir la resolución 171/16 con respecto a seguridad eléctrica/electrónica.	Ley Argentina
REQ-11	El producto debe basarse en las disposiciones que se consideren de interés establecidas por la norma IEC 60335.	Ley Internacional
REQ-12	El producto deberá poder cortar el césped de forma autónoma.	Tácito
REQ-13	El producto deberá cumplir el estándar IP66.	Tácito
REQ-14	El producto deberá poder operarse en condiciones normales de temperatura y humedad del territorio argentino.	Tácito
REQ-15	El producto deberá reportar el nivel de batería especialmente cuando éste sea crítico.	Tácito
REQ-16	El motor de corte debe parar si el producto es levantado o volteado.	Tácito
REQ-17	La web app deberá poder guardar como mínimo 5 recorridos diseñados por el usuario.	Tácito
REQ-18	El producto deberá operar con tecnología wifi IEEE 802.11.	Tácito
REQ-19	El producto deberá funcionar con baterías recargables.	Tácito
REQ-20	El producto deberá tener una vida útil mínima de 6 meses.	Ley Argentina

Tabla 8.1.3: Requerimientos

10.2. Diagrama Funcional de Interfaces

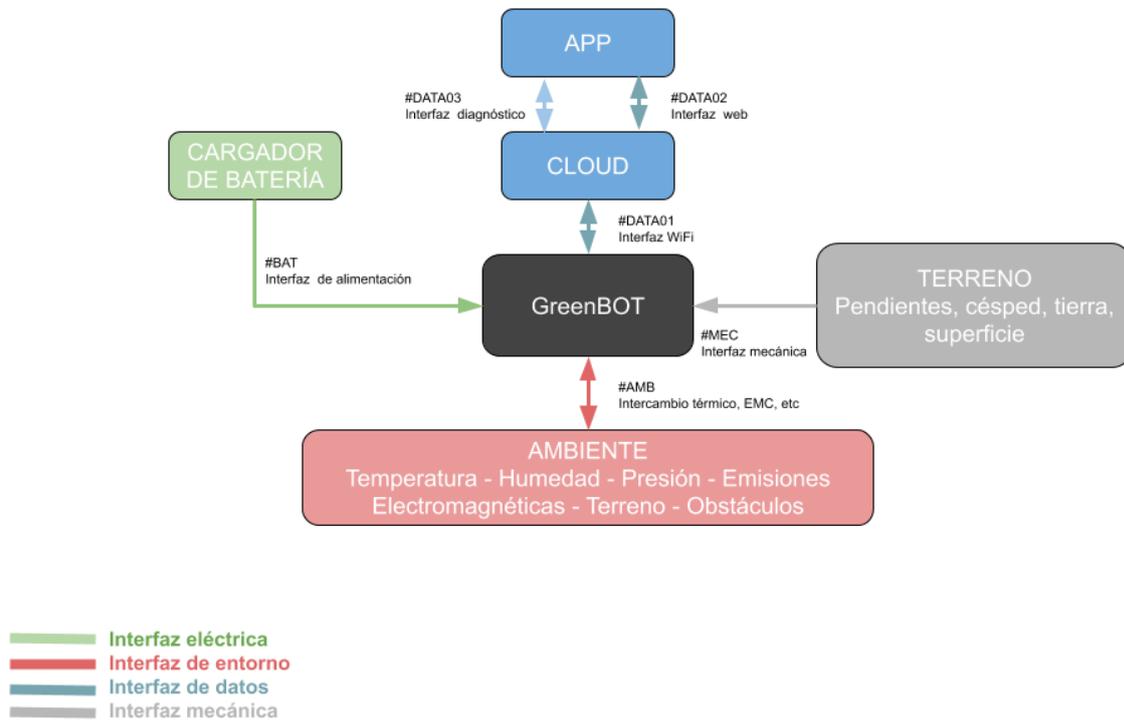


Figura 15 Diagrama Funcional de Interfaces

10.3. Especificaciones de Diseño

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

Tabla 3 Leyenda de uso en especificaciones

10.3.1. Especificaciones Funcionales

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-DIS-01	El dispositivo deberá detectar objetos y cambiar su trayectoria en caso de que resulte necesario.	REQ-08 REQ-12	DP, DF S, T
FUN-DIS-02	El dispositivo deberá poder realizar todo el recorrido del área a cortar de manera automática, sin intervención del usuario.	REQ-08 REQ-12	DP, DF S, T
FUN-DIS-03	El dispositivo deberá poder realizar todo el recorrido del área a cortar de manera manual, controlado por el usuario a través de una web app.	REQ-09 REQ-05	DP, DF T
FUN-DIS-04	El dispositivo utilizará una tanza para realizar el corte.	REQ-12	DF I, D
FUN-DIS-05	La web app deberá poder guardar al menos 10 perímetros diferentes por cada usuario.	REQ-09 REQ-17	DP, DF I

Tabla 4 Especificaciones Funcionales del Dispositivo

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-INS-01	El usuario deberá poder realizar la inicialización del dispositivo y la demarcación del perímetro a cortar de manera manual y sin necesidad de personal especializado.	REQ-05 REQ-06 REQ-09	DP, DF T
FUN-INS-02	Deberá existir una estación de carga que además funcione como punto de referencia, cuya instalación pueda realizarse por el usuario mismo.	REQ-06 REQ-19	DF I, D

Tabla 5 Especificaciones Funcionales de la Instalación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-APP-01	El producto deberá poder conectarse a una web app accesible desde el dispositivo móvil o computadora del usuario.	REQ-05 REQ-09 REQ-15 REQ-17	DP, DF T

Tabla 6 Especificaciones Funcionales de la Aplicación

10.3.2. Especificaciones de Interfaz

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-AMB-01	El dispositivo deberá funcionar para pendientes menores a 20°.	REQ-12	DF T
INT-AMB-02	El dispositivo deberá poder conectarse a una red wifi 802.11 b/g/n.	REQ-18	DP, DF T
INT-AMB-03	El dispositivo podrá trabajar en suelos que impliquen un coeficiente de rodadura menor a 0,052 (barro) y mayor a 0,01 (carretera lisa).	REQ-12	DF T
INT-AMB-04	El dispositivo deberá poder evadir obstáculos siempre y cuando no sean pozos, pendientes abruptas u objetos con alturas menores a la de corte.	REQ-08 REQ-12	DP, DF T
INT-AMB-05	El dispositivo deberá detener su proceso de corte si se despega del suelo.	REQ-11 REQ-16	DP, DF T

Tabla 7 Especificaciones de Interfaz de Ambiente

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-ELE-01	El dispositivo debe poder cargarse con un cargador de batería comercial y estandarizado.	REQ-19	DF T

Tabla 8 Especificaciones de Interfaz Eléctrica

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-DAT-01	La web app deberá poder definir sistema autónomo o manual para el proceso de corte.	REQ-05 REQ-09 REQ-12	DP, DF T
INT-DAT-02	La web app deberá contar con una interfaz para controlar manualmente la marcha y la dirección del dispositivo.	REQ-05 REQ-09	DP, DF I, D
INT-DAT-03	El dispositivo deberá poder reportar a la web app enviando información acerca del proceso de corte.	REQ-09	DP, DF T
INT-DAT-04	La web app deberá tener una opción de elegir y armar una programación de corte.	REQ-09 REQ-17	DF T
INT-DAT-05	El dispositivo deberá informar a la web app su nivel de batería.	REQ-09 REQ-15	DF T

Tabla 9 Especificaciones de Interfaz de Data

10.3.3. Especificaciones de Performance

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
PER-01	El dispositivo deberá poder realizar el proceso de corte entero sin necesidad de recargar la batería hasta un área máxima de operación de 100m ² .	REQ-04	DF, DP S, T
PER-02	El dispositivo no podrá salir más de 30 cm del perímetro demarcado en la instalación.	REQ-12	DP, DF S, T
PER-03	El usuario podrá regular la altura de corte manualmente.	REQ-03	DF I
PER-04	El dispositivo deberá cortar un área mayor al 95% respecto a aquella delimitada por el usuario.	REQ-12	DP, DF T

Tabla 10 Especificaciones de Performance

10.3.4. Especificaciones de Implementación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-OPE-01	El dispositivo deberá alcanzar una velocidad máxima de 0,25 m/s y una mínima de 0,10 m/s.	REQ-04	DF T
IMP-OPE-02	El dispositivo deberá alcanzar su velocidad máxima en 3 segundos, implicando una aceleración de 0,083 m/s ² .	REQ-04	DF T
IMP-OPE-03	El dispositivo deberá operar normalmente con temperaturas de ambiente entre 0°C y 50°C.	REQ-14	DF D
IMP-OPE-04	El dispositivo deberá operar normalmente con humedad de ambiente entre 0 y 90%.	REQ-14	DF D
IMP-OPE-05	El dispositivo deberá operar normalmente con presión atmosférica entre 90 kPa y 103 kPa.	REQ-14	DF D
IMP-OPE-06	El motor corte deberá girar a una velocidad entre 8000 rpm y 12500 rpm.	REQ-04	DF D

Tabla 11 Especificaciones de Operación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-EMC-01	El dispositivo deberá poder operar normalmente con inmunidad al ruido electromagnético de acuerdo con la norma IEC 60335.	REQ-11	DF T

Tabla 12 Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-ALM-01	El dispositivo deberá ser almacenado en las mismas condiciones de temperatura, humedad y presión que las mencionadas en especificaciones de operación	REQ-14	DF D

Tabla 13 Especificaciones de Almacenamiento

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-DIM-01	El dispositivo no deberá exceder las siguientes dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> ● Longitud < 60cm ● Ancho < 60 cm ● Alto < 30 cm 	REQ-01	DF T
IMP-DIM-02	El dispositivo no deberá pesar más de 15 Kg	REQ-02	DF T

Tabla 14 Especificaciones de Dimensión y Peso

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-COS-01	El costo de fabricación del producto no deberá superar los US \$500.	REQ-07	DF, D
IMP-COS-02	El precio de venta del producto deberá ser igual o menor a US \$1000.	REQ-07	DF D
IMP-COS-03	El producto deberá ser implementado siempre que sea posible con materiales y componentes de grado comercial (COTS).	REQ-07	DF D

Tabla 15 Especificaciones de costos

10.3.5. Especificaciones de Servicio (RAMS)

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-CON-01	El producto deberá tener una vida útil no menor a 2 años.	REQ-20	DF D
RAM-CON-02	Todos los componentes críticos deberán ser testeados previo a la fabricación de cada módulo	REQ-20	DF D

Tabla 16 Especificaciones de Confiabilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-MAN-01	La web app debe estar en constante comunicación con el dispositivo y avisarle al usuario ante cualquier problema de conectividad.	REQ-05 REQ-09 REQ-15 REQ-17	DF T
RAM-MAN-02	Deberá haber una indicación visual clara cuando el equipo está energizado.	REQ-10 REQ-11	DP, DF I
RAM-MAN-03	El usuario no debe poder acceder a los componentes de los módulos.	REQ-10 REQ-11	DF I
RAM-MAN-04	El producto deberá incluir un Manual de Usuario.	REQ-10 REQ-11	DF I

Tabla 17 Especificaciones de Mantenibilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-SEG-01	La máxima temperatura que podrá tener la carcasa será de 70°C, o 20°C por encima de la temperatura ambiente.	REQ-10 REQ-11	DF D
RAM-SEG-02	El equipo debe detener el motor de corte al levantarse o chocar con un objeto.	REQ-10 REQ-11 REQ-16	DP, DF T
RAM-SEG-03	El equipo debe detenerse en caso de detectar un torque anormal en alguno de los motores.	REQ-10 REQ-11	DF T
RAM-SEG-04	No deberá ser posible para una persona realizarse ningún tipo de corte por contacto con el equipo.	REQ-10 REQ-11	DF D

Tabla 18 Especificaciones de Seguridad

11. Plan de Validación

11.1. Diseño de Bancos de Pruebas

A. Banco para verificar la interconectividad del dispositivo

Se deberá poder energizar el equipo (5V para el prototipo, 24V para el producto final). Se contará con una red wifi a la que pueda conectarse el dispositivo y una computadora. Se verificará la conexión a esta, así como también la comunicación entre el equipo y la web app. El banco deberá implementarse en el mismo ambiente de operación, en condiciones normales de presión, humedad y temperatura. Las verificaciones se realizarán mediante inspección visual.

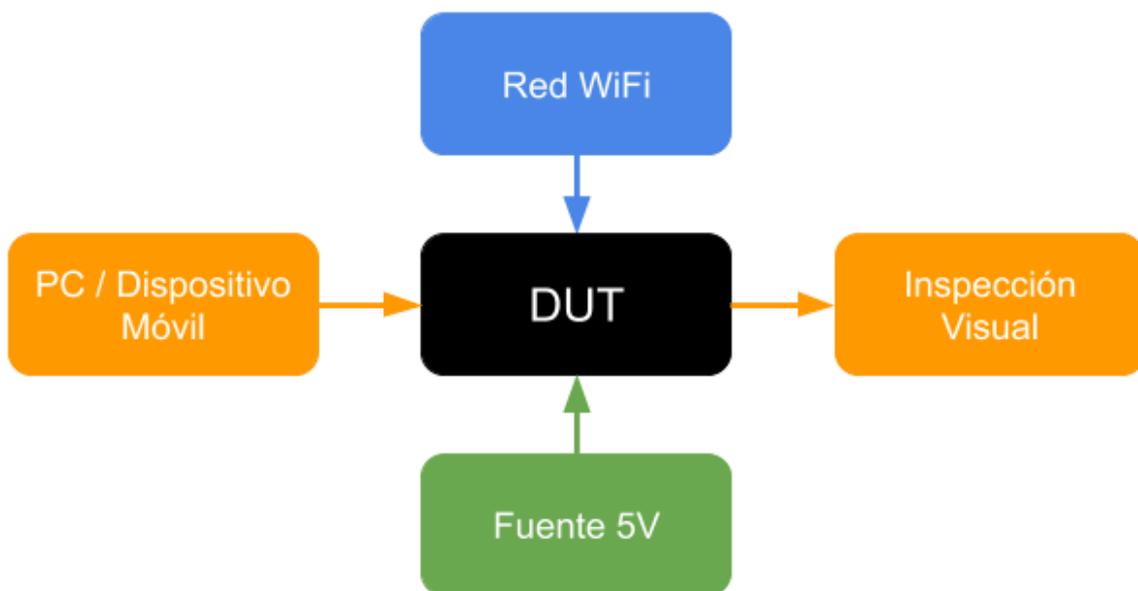


Figura 16 Banco de Pruebas A

B. Banco para verificar especificaciones operacionales del dispositivo en funcionamiento

Deberá ser posible energizar el equipo (5V para el prototipo, 24V para el producto final), y debe contarse con una red wifi a la que pueda conectarse tanto el dispositivo como una computadora. El equipo deberá encontrarse en una superficie al aire libre (césped para el producto final, madera para el prototipo), donde se puedan marcar recorridos y trayectos en el espacio físico para validar el correcto posicionamiento, así como también el recorrido determinado por el modo autónomo, y el manejo manual para la demarcación de un perímetro determinado. Deberá ser posible, de ser necesario, introducir obstáculos en el área de recorrido para validar la detección de obstáculos.

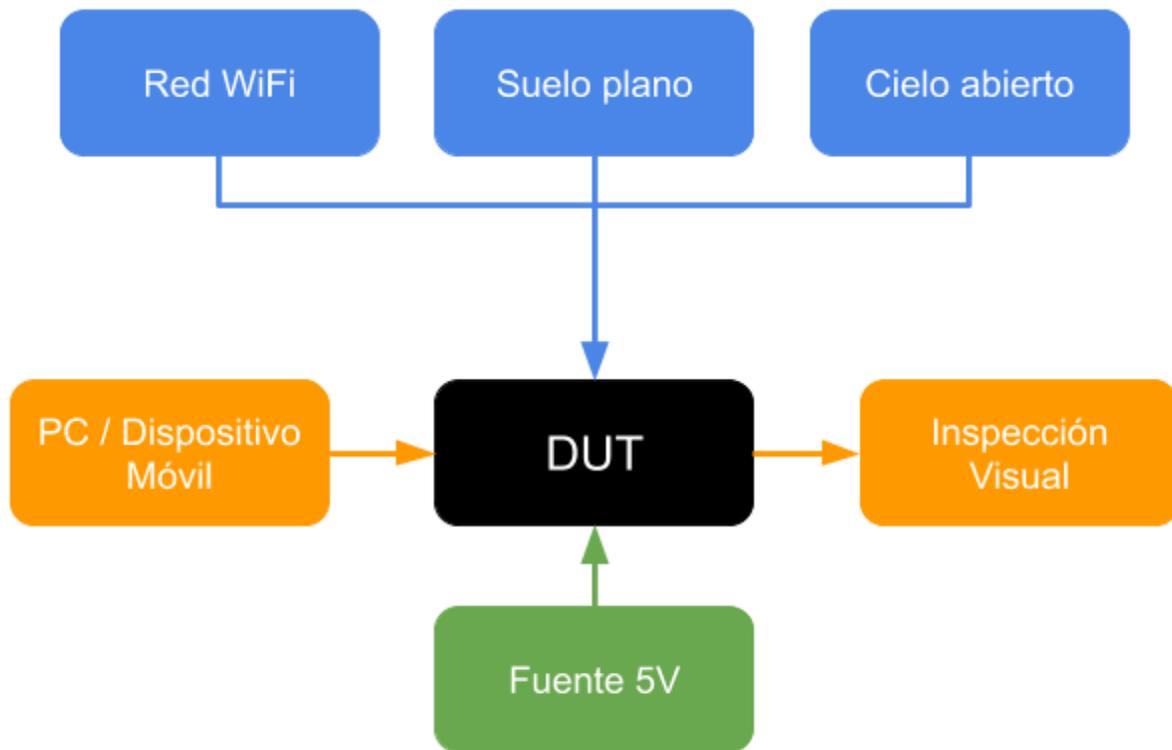


Figura 17 Banco de pruebas B

C. Banco para verificar especificaciones de dimensiones

Este banco de pruebas permitirá realizar las pruebas para determinar las correctas dimensiones de la cortadora, siendo estas las especificaciones IMP-DIM-01 e IMP-DIM-02, una referida al peso de la cortadora y otra a las dimensiones.

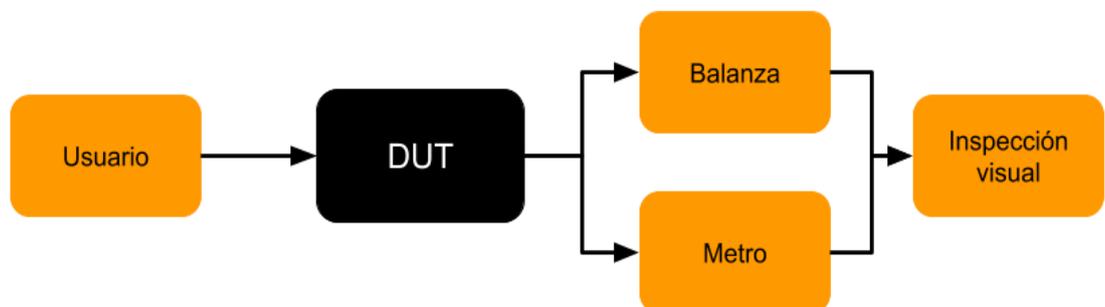


Figura 18 Banco de pruebas C

11.2. Especificaciones de Tests

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
Precondiciones: Ninguna Procedimiento General: Se deberá conectar el DUT al banco de pruebas C.		
T-DIM-01 Final	1. Medir el ancho, largo y alto del equipo	El ancho y largo son menos de 60 cm, y el alto menor a 30 cm.
T-DIM-02 Final	1. Pesar el equipo	El equipo pesa menos de 15kg.

Tabla 19 Tests de dimensiones

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Ninguna</p> <p>Procedimiento General: Para las siguientes pruebas, se deberá conectar el DUT al banco de pruebas A. El DUT deberá estar correctamente alimentado. Se deberá contar con un dispositivo móvil o computadora capaz de conectarse a una red con acceso a internet. Los mensajes recibidos serán mostrados en una web app.</p>		
<p>T-COM-01 Proto, Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT se encuentra energizado y listo para utilizarse. 2. Acceder desde la computadora o dispositivo móvil a la web app. 3. Verificar que el DUT y la web app se encuentran comunicados. 	<p>Se puede acceder a la web app.</p> <p>La web app reporta datos del DUT.</p>
<p>T-COM-02 Proto, Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. A través de la web app, enviar señales de movimiento al DUT (adelante, atrás, derecha o izquierda). 3. Verificar mediante inspección visual que el equipo realiza los movimientos pretendidos. 4. Verificar mediante inspección visual la respuesta del equipo. 	<p>El DUT ejecuta las instrucciones enviadas desde la web app.</p>
<p>T-COM-03 Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT se encuentra energizado y listo para utilizarse. 2. Acceder desde la computadora o dispositivo móvil a la web app. 3. Verificar que el DUT y la web app se encuentran comunicados. 4. Inhabilitar la red wifi a la que se encuentra conectado el DUT, asegurando la pérdida de comunicación. 	<p>La web app reporta correctamente la pérdida de conectividad con el producto.</p>

Tabla 20 Tests de comunicación

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones : T-COM-01, T-COM-02</p> <p>Procedimiento General: Para esta prueba, se deberá insertar el DUT en el banco de pruebas B. Debe haberse verificado la correcta alimentación del equipo y su funcionamiento. También se debe tener un dispositivo móvil con la web app abierta para poder controlar al DUT y leer los valores medidos. Toda la prueba debe realizarse con el DUT en modo manual. En la superficie plana, debe marcarse un perímetro visible.</p>		
<p>T-MAN-01 Proto, Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Definir la variable “Error máximo” $\varepsilon_{máximo}$, para identificar la máxima desviación con respecto al perímetro delimitado. 4. Demarcar un recorrido perimetral en la superficie de operación. 5. Seleccionar el modo manual de la web app. 6. Guiar a la cortadora de césped sobre el perímetro marcado utilizando los controles de la web app móvil. 7. Guardar el perímetro grabado en la web app. 8. Verificar que el recorrido grabado coincide con el demarcado en la superficie. 9. Analizar el error máximo. 	<p>El DUT responde correctamente a los comandos del usuario.</p> <p>El perímetro fue grabado correctamente en la web app.</p> <p>$\varepsilon_{máximo} \leq 30cm.$</p>
<p>T-MAN-02 Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Demarcar un recorrido perimetral en la superficie de operación, asegurándose que deba subir y bajar una pendiente de 20 °. 4. Seleccionar el modo manual de la web app. 	<p>El perímetro fue grabado correctamente en la web app.</p> <p>El DUT puede completar el recorrido sin ser obstaculizado por la pendiente.</p>

	<ol style="list-style-type: none"> 5. Guiar a la cortadora de césped sobre el perímetro marcado utilizando los controles de la web app móvil. 6. Guardar el perímetro grabado en la web app. 7. Verificar que el recorrido grabado coincide con el demarcado en la superficie. 8. Verificar los niveles de batería tanto físicos como aquellos reportados por la web app. 9. Cargar las baterías mediante el cargador comercial y volver a verificar los niveles de batería. 	<p>Los niveles de batería reportados por la web app tienen un error menor al 5% del total de carga de las baterías con respecto al medido en la cortadora.</p> <p>Los niveles de batería vuelven a alcanzar al menos 95%.</p>
<p>T-MAN-03</p> <p>Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Delimitar una recta de trayectoria de longitud conocida en la superficie. 4. Seleccionar el modo manual de la web app. 5. Habiendo alcanzado su velocidad máxima, medir el tiempo que tarda la cortadora en recorrer la trayectoria marcada previamente. 6. Calcular la velocidad. 7. Medir el tiempo que tarda la cortadora desde el reposo en alcanzar su velocidad máxima. 8. Repetir los pasos 5 al 7 al menos 10 veces. 	<p>La velocidad máxima es menor a 0,25 m/s y mayor a 0,1 m/s</p> <p>Alcanza su velocidad máxima desde el reposo en menos de 3 segundos.</p>

Tabla 21 Tests de operación manual

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
Precondiciones: T-COM-01, T-COM-02, T-MAN-01		
<p>Procedimiento General: Para todas estas pruebas, se deberá insertar el DUT en el banco de pruebas B. Debe haberse verificado la correcta alimentación del equipo y su funcionamiento. También se debe tener la web app abierta en el dispositivo móvil para poder controlar al DUT y leer los valores medidos. Las pruebas deben realizarse en una superficie plana al aire libre. Deberá poder colocarse objetos de altura mayor a 5cm en distintos puntos dentro del perímetro mencionado. Se debe ubicar un punto de referencia de donde partirá el equipo. Debido a la escala del prototipo, se validará un área menor a la máxima de 100m² especificada.</p>		
<p>T-AUT-01 Proto, Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Definir el parámetro “Eficiencia de corte” E_{corte} como el porcentaje del área cortada sobre el área total. 4. Ingresar a la web app. 5. Seleccionar un perímetro guardado. 6. Seleccionar el modo autónomo e iniciar el proceso de corte. 7. Verificar que el equipo realiza el corte en su totalidad, regresando al punto de referencia inicial. 	<p>El equipo completa el recorrido autónomo.</p> <p>$E_{corte} \geq 95\%$</p> <p>Se observa en la web app reportes de datos del DUT.</p>
<p>T-AUT-02 Proto, Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Delimitar un recorrido a realizar desde el modo manual. 4. Definir la variable “Error máximo” $\varepsilon_{máximo}$, para identificar la máxima desviación con respecto al recorrido delimitado. 5. Marcar en la superficie líneas a 20 cm del recorrido realizado. 6. Realizar en modo autónomo dicho recorrido. 7. Grabar en la web app móvil la trayectoria realizada. 	<p>$\varepsilon_{máximo} \leq 20cm$</p> <p>en cada una de las 10 repeticiones.</p>

	8. Repetir 10 veces y analizar resultados.	
T-AUT-03 Proto,Final	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Iniciar el proceso de corte autónomo 4. Levantar el DUT en cualquier momento del recorrido. 5. Verificar que todos los motores se detengan y se apague el LED testigo. 6. Corroborar que se informó correctamente a la web app al levantarse. 7. Verificar que ningún motor se encienda estando levantado del suelo. 8. Corroborar que la web app informe de la situación y no permita reanudar automáticamente. 	<p>Se informa correctamente a la web app.</p> <p>Los motores se paran al ser levantado el equipo.</p> <p>La web app no permite reanudar el proceso.</p>
T-AUT-04 Proto,Final	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Delimitar un recorrido a realizar desde el modo manual. 4. Marcar en la superficie líneas a 30 cm del recorrido realizado. 5. Introducir un obstáculo mayor a 5cm de altura en el área de operación. 6. Iniciar el proceso de corte autónomo. 7. Observar el comportamiento del LED testigo y el motor emulador de corte frente a la presencia del objeto. 8. Verificar que la web app haya informado sobre la presencia del objeto cuando este se detecte. 9. Grabar en la web app la trayectoria realizada. 10. Repetir 10 veces y analizar resultados. 	<p>El equipo detecta, esquiva el obstáculo y retoma la trayectoria.</p> <p>El equipo frena el motor de corte al detectar el obstáculo y apaga el LED testigo.</p>
T-AUT-05 Final	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 	<p>El equipo se detiene al detectar un</p>

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Delimitar un recorrido a realizar desde el modo manual. 4. Iniciar el proceso de corte autónomo. 5. Forzar al equipo a tener que hacer un torque anormal, ya sea frenando una de las ruedas o introduciendo un peso al equipo. 6. Verificar que el equipo se detiene. <p>Repetir 10 veces y analizar resultados.</p>	<p>torque anormal en uno de los motores.</p>
<p>T-AUT-06</p> <p>Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el DUT y el dispositivo móvil estén encendidos y listos para usarse. 2. Verificar la conexión entre la web app y el DUT. 3. Delimitar un recorrido a realizar desde el modo manual. 4. Programar en la web app un horario para comenzar el modo autónomo 5. Verificar que el equipo comienza el corte autónomo a la hora programada. <p>Repetir 10 veces y analizar resultados.</p>	<p>El equipo comienza el corte autónomo a la hora programada con un error menor a los 5 minutos.</p>

Tabla 22 Tests de autonomía

11.3. Especificaciones de Simulaciones

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Ninguna</p> <p>Procedimiento General: Crear un emulador en lenguaje C para ejecutar en el mismo microcontrolador que se utilizará en el Módulo Central de la cortadora. Se debe permitir simular los valores de orientación y posición en reemplazo de los valores reales que se medirán a futuro. Definiendo condiciones iniciales, el sistema de navegación actúa simulando el control de los motores y, por ende, induciendo nuevos cambios en las variables de orientación y posición. Es necesario definir previo a la ejecución la trayectoria que se debe realizar. Por último, se debe habilitar un puerto para extraer los resultados del microcontrolador.</p>		
<p>S-AUT-01</p> <p>Final</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer los valores iniciales de las variables: <ul style="list-style-type: none"> • Posición inicial: (0;0) • Orientación inicial: 90° • Velocidad lineal: 20 m/s 	<p>$\epsilon_{max} \leq 15cm$</p> <p>El recorrido se mantiene</p>

Prototipo	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de rotación: $10^\circ/s$ <ol style="list-style-type: none"> 2. Seleccionar mediante la web app el Modo Autónomo de operación. 3. Definir el error máximo de posición ε_{max}. 4. Extraer resultados de posición y graficar. 5. Analizar errores en el recorrido. 	siempre dentro del perímetro definido
S-AUT-02 Final Prototipo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repetir la simulación S-AUT-01 agregando los siguientes errores en la medición de posición, la de orientación y en la ejecución de las rotaciones: <ul style="list-style-type: none"> • $\varepsilon_{pos} \leq 5cm$ • $\varepsilon_{orient} \leq 3^\circ$ • $\varepsilon_{giros} \leq 10^\circ$ 2. Extraer resultados de posición y graficar. 3. Analizar errores. 	$\varepsilon_{max} \leq 15cm$ El recorrido se mantiene siempre dentro del perímetro definido

Tabla 23 Simulación de recorrido

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
Precondiciones: S-AUT-02 Procedimiento General: Crear un emulador en lenguaje C para ejecutar en el mismo microcontrolador que se utilizará en el Módulo Central de la cortadora. Se debe permitir simular los valores de orientación y posición en reemplazo de los valores reales que se medirán a futuro. Además, en esta simulación el emulador debe representar el accionar de los sensores de detección frente a la presencia de un objeto. Definiendo condiciones iniciales, el sistema de navegación actúa simulando el control de los motores y, por ende, induciendo nuevos cambios en las variables de orientación y posición. Es necesario definir previo a la ejecución la trayectoria que se debe realizar. Por último, se debe habilitar un puerto para extraer los resultados del microcontrolador.		
S-OBJ-01 Final Prototipo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer los valores iniciales de las variables y los errores en las mediciones: <ul style="list-style-type: none"> • Posición inicial: (0;0) • Orientación inicial: 90° • Velocidad lineal: 20 m/s • Velocidad de rotación: $10^\circ/s$ • $\varepsilon_{pos} \leq 5cm$ • $\varepsilon_{orient} \leq 3^\circ$ • $\varepsilon_{giros} \leq 10^\circ$ 	El recorrido se realiza sin atravesar el objeto ni salir del perímetro

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Definir la posición de un objeto cuadrado a través de la ubicación de sus vértices. 3. Seleccionar mediante la web app el Modo Autónomo de operación. 4. Definir el error máximo de posición ε_{max}. 5. Extraer resultados de posición y graficar. 6. Analizar errores en el recorrido. 	
--	--	--

Tabla 24 Simulación de evasión de objetos

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: S-AUT-02, T-COM-01, T-COM-02</p> <p>Procedimiento General: Crear un emulador en lenguaje C para ejecutar en el mismo microcontrolador que se utilizará en el Módulo Central de la cortadora. Se debe permitir simular los valores de y posición en reemplazo de los valores reales que se medirán a futuro.</p> <p>Cargar el programa y colocar la cortadora en una superficie lisa, con espacio para rotar. Las baterías de esta deben estar completamente cargadas y debe estar conectada a internet. Deben estar en funcionamiento todos los módulos del equipo, con excepción del de posicionamiento.</p> <p>Es necesario definir previo a la ejecución la trayectoria que se debe realizar. La cortadora rotará en el lugar y medirá la orientación a través de la IMU, pero simulará los avances y retrocesos. Por último, se debe habilitar un puerto para extraer los resultados del microcontrolador.</p>		
<p>S-HIB-01</p> <p>Final</p> <p>Prototipo</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer los valores iniciales de las variables y los errores en las mediciones: <ul style="list-style-type: none"> • Posición inicial: (0;0) • Orientación inicial: 90° • Velocidad lineal: 20 m/s • $\varepsilon_{pos} \leq 5cm$ 2. Seleccionar mediante la web app el Modo Autónomo de operación. 3. Definir el error máximo de posición ε_{max}. 4. Extraer resultados de posición y graficar. 5. Analizar errores en el recorrido. 	<p>$\varepsilon_{max} \leq 15cm$</p> <p>El recorrido se mantiene siempre dentro del perímetro definido</p>

Tabla 25 Simulación híbrida

11.4. Matriz de Trazabilidad de Validación

Origen	REQ ID	ESP ID	TEST ID	
Encuesta	REQ-05	FUN-DIS-01	T-AUT-04	
	REQ-06	FUN-DIS-02	T-AUT-01	
	REQ-08	FUN-DIS-03	T-MAN-01	
	REQ-09	FUN-INS-01		
	REQ-012	INT-AMB-01	T-MAN-02	
	Funcionamiento general			
Encuesta/ Tácito	REQ-05	FUN-APP-01	T-COM-01	
	REQ-09	FUN-AMB-02	T-COM-02	
	REQ-12	RAM-MAN-01	T-COM-03	
	REQ-15	INT-DAT-01	T-MAN-01	
	REQ-17			
	REQ-18	INT-DAT-03	T-AUT-01	
	Web app y comunicación			T-AUT-02
			INT-DAT-04	T-AUT-06
Encuesta/ Tácito	REQ-04	INT-AMB-04	T-AUT-01	
	REQ-08	PER-01	T-AUT-03	
	REQ-12	PER-02	T-AUT-04	
	Modo autónomo	PER-04		
Encuesta/ Tácito	REQ-10	RAM-SEG-02	T-AUT-02	
	REQ-11		T-AUT-04	
	Seguridad	RAM-SEG-03	T-AUT-05	
Encuesta/ Tácito	REQ-09	INT-ELE-01	T-MAN-02	
	REQ-15			
	REQ-19	INT-DAT-05		
	Baterías			

Encuesta	REQ-01	IMP-DIM-01	T-DIM-01
	REQ-02	IMP-DIM-02	T-DIM-02
	Dimensiones		
Tácito	REQ-04	IMP-OPE-01	T-MAN-03
	Operación	IMP-OPE-02	

Tabla 26 Matriz de trazabilidad de validación

11.5. Diagrama de dependencias

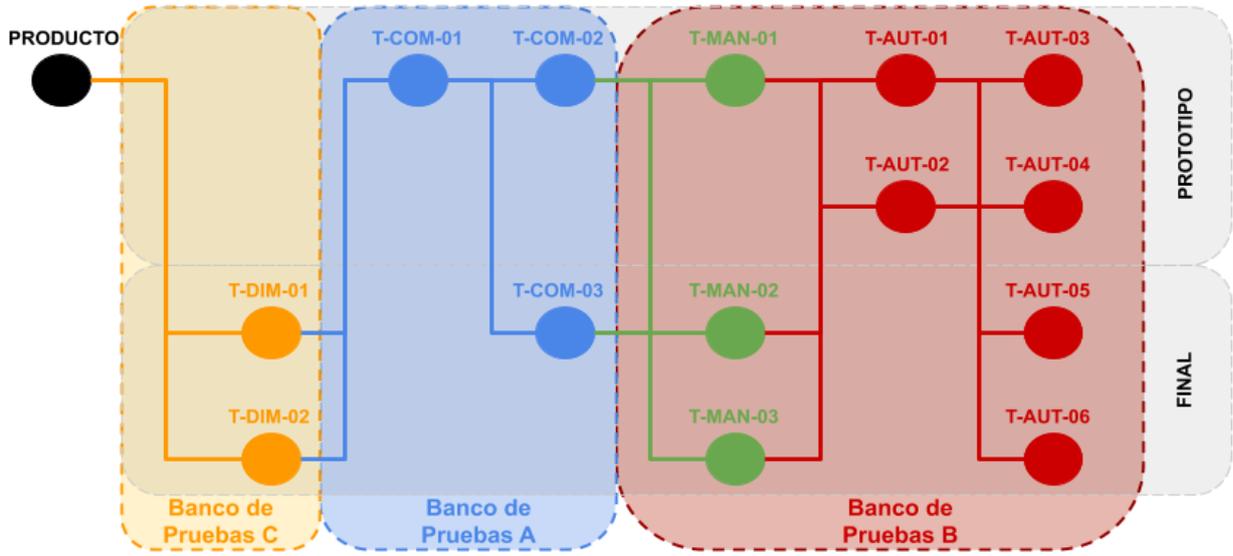


Figura 19 Diagrama de dependencias del producto

12. Análisis de Factibilidad

12.1. Factibilidad tecnológica

12.1.1. Esquema Modular

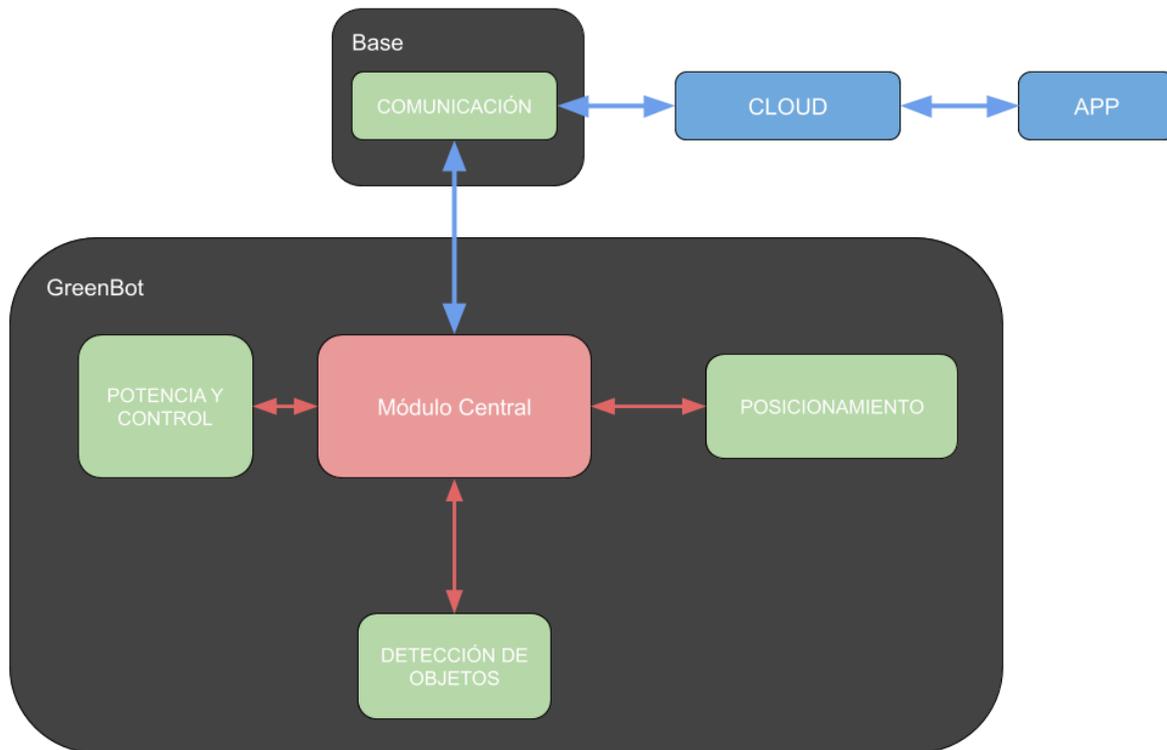


Figura 20 Diagrama Modular

12.1.2. Propuestas de Alternativas de Diseño

12.1.2.1. Módulo Central

La comunicación entre el usuario y el producto es una de las prestaciones críticas del diseño, ya que permite la implementación de una web app para configurar, controlar y monitorear la cortadora de césped. Además, la comunicación entre el Módulo Central y los demás módulos resulta esencial para lograr un proceso eficiente y robusto. Los puntos para analizar serán los siguientes:

- El producto debe tener conectividad wifi 802.11 para enviar y recibir datos para sus respectivas tareas cumpliendo con el requerimiento REQ-18.
- Se tendrá en consideración el costo de dicho módulo cumpliendo con el requerimiento REQ-07.

- Se debe permitir la comunicación entre módulos mediante I2C y UART.
- Debe tener suficiente memoria y capacidad de procesamiento para ejecutar todo el algoritmo de recorrido autónomo y el control en modo manual.

Si bien se analizaron diferentes marcas y modelos, la elección del microcontrolador para el Módulo Central se redujo a dos opciones, que se pueden observar en la tabla a continuación.

Parámetro	Espressif Systems	Raspberry PI
Imagen		
Modelo	ESP32-DevkitC-32D	Raspberry PI Zero W
Protocolo wifi	802.11 b/g/n	802.11b/g/n
Costo promedio	US \$3	US \$10
Memoria	<ul style="list-style-type: none"> • 448KB ROM • 520 KB SRAM • 16 KB SRAM in RTC • Flash-SRAM 4x16 MB 	<ul style="list-style-type: none"> • 512MB RAM • Memoria microSD
Modo bajo consumo	Si	Si

Tabla 27 Comparación de unidades de procesamiento

El ESP32 es un microcontrolador diseñado para aplicaciones móviles e IoT. El microprocesador integrado es capaz de manejar todas las tareas que tiene que ejecutar el módulo, incluida la conexión wifi. Gracias a las características mencionadas y a su alcance, costo y tamaño, el ESP32 resulta una opción viable para implementar el módulo central de la cortadora de césped.

A diferencia del ESP32, la RaspberryPi Zero es una computadora, lo cual tiene sus ventajas y desventajas. Como ventaja, brinda una mayor facilidad a la hora de programarla comparado a un microcontrolador, ya que utiliza Linux, un sistema operativo capaz de compilar y ejecutar programas escritos en gran variedad de lenguajes, como C, Java o Python, inclusive de manera simultánea. Sin embargo, el hecho de ser una computadora significa que el sistema operativo debe estar dedicando tiempo de manera constante a mayor cantidad de subrutinas, como lo pueden ser los drivers de periféricos no utilizados (mouse, teclado, monitor, etc.), por lo cual operaciones que requieran

menores tiempo de respuesta no podrán ser ejecutadas de manera eficiente. Además, tiene costo y tamaño mayor al ESP32, lo que dificulta su integración con el resto de los componentes.

Tras realizar el análisis, se definió que la mejor implementación del Módulo Central de la cortadora de césped será la que utilice un microcontrolador ESP32.

Como se mencionó previamente, el sistema completo cuenta con dos módulos de comunicación, uno en la base y otro en la robótica móvil, para lo cual se realizará un análisis para cada parte por separado.

12.1.2.2. Base de carga

Para la base de carga se analizaron las mismas tecnologías que para el Módulo Central. La base tendrá incorporado un módulo de GNSS con su respectiva antena y ejecutará el algoritmo de posicionamiento a través de la librería RTK, por lo cual requerirá más capacidad de computación. Teniendo esto en cuenta y, considerando que la misma no sólo se comunicará con la cortadora sino que también con los servicios de la nube, resulta necesario asignar a este módulo la opción con más capacidad de procesamiento, es decir, la Raspberry Pi Zero.

12.1.2.3. Posicionamiento

El dispositivo deberá ser capaz de conocer su ubicación con respecto a la base en todo momento, para poder determinar el recorrido a realizar y poder cumplir con el requerimiento REQ-12 y la especificación PER-02. Se analizaron las siguientes tecnologías para medir la posición relativa:

- **Triangulación por tiempo de vuelo:** Consiste en contar con dispositivos adicionales activos capaz de medir la distancia entre ellos y la cortadora, para así poder triangular la posición de esta.
- **Posicionamiento satelital:** Consiste en posicionamiento por GNSS de la cortadora. No se limita solo a un módulo GNSS necesariamente, puede ser una combinación de varios, como por ejemplo, realizar GPS diferencial (particularmente, RTK).

Se comparan ambas tecnologías considerando los siguientes puntos: precisión, precio, escalabilidad, facilidad de instalación, complejidad computacional, robustez.

- **Precisión:** Tiempo de vuelo suele tener mayor precisión que el uso de GNSS. Sin embargo, mediante el uso de RTK, es posible obtener precisiones del orden del centímetro respecto a un punto base, lo cual se encuentra dentro de las especificaciones de este producto.
- **Precio:** El uso de GNSS aumenta los costos en el caso de jardines simples donde la implementación de tiempo de vuelo requiera pocos sensores (en el orden de 4 o 5). Sin embargo, si la forma del terreno a cortar tiene un perímetro irregular, se requieren implementar mayor cantidad de sensores, aumentando el costo del producto.
- **Escalabilidad:** Un jardín con disposición más compleja (por ejemplo, por el frente y detrás de una vivienda) puede requerir una inversión adicional en más dispositivos de triangulación, mientras que utilizando posicionamiento satelital no se requiere modificación alguna.
- **Facilidad de instalación:** El uso de dispositivos en el jardín para triangulación por tiempo de vuelo implica un esfuerzo adicional por parte del usuario, debido a que debe colocar y realizar un mantenimiento de dichos dispositivos, mientras que ese paso no es necesario para GNSS.

- **Robustez:** En este aspecto ambos tienen una ventaja respecto a la otra tecnología, dependiendo de la orientación de los obstáculos. Para triangulación por tiempo de vuelo el mayor problema son los obstáculos entre el dispositivo y los puntos fijos, debido a que una interferencia puede dar una mayor incertidumbre en la posición. Además, la presencia de superficies verticales (por ejemplo, paredes), aumenta el error de esta tecnología. En el caso de GNSS, los obstáculos más problemáticos son aquellos que se encuentren entre el receptor GNSS y los satélites (como, por ejemplo, galerías, techos, nubes, etc.). Debido al trabajo en jardines abiertos, se considera que la tecnología GNSS es más robusta frente a los obstáculos allí presentes.

Con estas consideraciones, se opta por la utilización de tecnología GNSS, particularmente el uso de RTK para poder lograr la precisión relativa a la base especificada en el diseño, y al mismo tiempo mantener la facilidad de instalación, uno de los enfoques más importantes de este trabajo.

Debe tenerse en cuenta que el algoritmo de RTK necesita de dos dispositivos GNSS (uno como base de referencia, uno como móvil) y que ambos tengan acceso a la información sin procesar recibida por los satélites de las diferentes constelaciones. Se ha optado por utilizar el módulo de u-blox modelo NEO M8T para utilizar en ambos casos (base y móvil), debido a que son los únicos con los que es posible realizar RTK y, debido al precio, mantenerse en el rango económico deseado para este producto.

12.1.2.4. Detección de objetos

A medida que la cortadora autónoma realiza el recorrido, es necesario que la misma detecte y esquive objetos en el camino, con el fin de evitar colisiones. Para poder realizar dicha función, se debe analizar de manera constante un área delante de la cortadora, definida por un arco cuyo ángulo de apertura estará definido más adelante. Para mayor robustez, se considerará el uso de distintas tecnologías de sensores. Los puntos a analizar serán los siguientes:

- Según el requerimiento REQ-08 se debe evadir obstáculos.
- Se tendrá en consideración el costo de dicho módulo cumpliendo con el requerimiento REQ-07.

De las soluciones posibles se destacan las tecnologías: sensores mecánicos, infrarrojos, ultrasónicos, por efecto doppler y visión artificial. Si bien se intentará utilizar una amplia cantidad de tecnologías distintas, las siguientes opciones fueron descartadas:

- Visión artificial: esta tecnología requiere mayor procesamiento y cámaras que aumentan el costo significativamente reduciendo el margen de lograr el REQ-07.
- Efecto Doppler (Doppler radar): la distancia de detección obtenible supera las necesarias para esta aplicación y los módulos integrados son relativamente costosos superando los 20 U\$D. Esta tecnología podría ser usada para la detección de proximidad (cuando una persona o animal se acerca a la cortadora) pero dicho problema puede ser resuelto con un sensor de menor costo.

En la siguiente tabla se muestran los datos más relevantes de las tecnologías restantes, para luego hacer un análisis de las opciones más adecuada para el producto.

Tecnología a analizar	Infrarrojo	Sonido	Fin de carrera
Imagen			
Componente	Transmisor: MLED81 Receptor: PT334-6B	UTR-1440K-TT-R	V-153-1V25
Costo por unidad	Transmisor: US \$0.1 Receptor: US \$0.18	US \$18.5 – US \$25.5	US \$1.0
Distancia de accionamiento	0.05m - 3m	0.12m - 2m	Por contacto

Tabla 28 Comparación de tecnologías para detección de obstáculos.

A continuación, se emplea una descripción breve y análisis de las tecnologías que se utilizarán en este proyecto:

- Analizando los costos de los transmisores y receptores de las distintas tecnologías se puede observar que la opción más conveniente es la de sensores infrarrojos. Sin embargo, la misma tiene algunas desventajas, como lo puede ser la interferencia provocada por fuentes de luz en el rango de longitudes de onda utilizadas (como el sol), por lo cual en la sección de ingeniería en detalle se realizará un análisis de la disposición óptima de los transmisores y receptores con el fin de minimizar el impacto de dichas fuentes de ruido.
- Se utilizará un fin de carrera como medida de seguridad adicional en caso de que las otras tecnologías fallen. Este sensor es un simple interruptor que se activa al recibir un impacto, cumpliendo la función de detectar cualquier obstáculo que no haya sido percibido previamente. Con el fin de tener información acerca de la posición de dicho contacto, se utilizarán 3 sensores, cubriendo aproximadamente 60° cada uno.

12.1.2.5. Motores

Dentro de esta sección se realizará un análisis de los motores necesarios, tanto para el desplazamiento del equipo como para el de corte. Para simplificar el análisis, se consideraron tres familias de motores, todos eléctricos. Dentro de cada familia, se detallan los parámetros para los mejores motores disponibles de precio igual o menor a US\$ 20 (para cumplir con el costo requerido del producto).

Parámetro	Motorreductor DC	Motor Brushless	Paso a Paso (Stepper)
Marca y modelo	IGNIS MR08D	Welgard A2212	Nema17
Imagen			
Consumo medio	1.27A	0.75A	1.5A
Velocidad media	66 RPM	8460 RPM	1200 RPM (4000 pasos/s)
Torque medio	31 Kgf*cm	0.1 Kgf*cm	42 Kgf*cm
Precio	US \$11	US \$17	US \$19
Peso	235g	57g	230g

Tabla 29 Comparación de tecnologías de motores.

En primer lugar, se descarta el motor brushless para el desplazamiento de la cortadora de césped por el bajo torque que puede entregar. De igual manera, se descartan los motorreductores y los paso a paso para el utilizar como motor de corte debido a las bajas velocidades que presentan. La primer definición es, por lo tanto, que se utilizará un motor brushless para realizar el corte de césped.

En segundo lugar, para decidir el motor de desplazamiento se compararon en detalle las tecnologías stepper y motorreductor. En consumo eléctrico, peso y torque presentan valores similares, lo cual no aporta información relevante en la comparación. La velocidad de giro es también irrelevante, ya que ambos tienen la capacidad de lograr que la cortadora de césped alcance la velocidad máxima deseada. Se observa que el precio de un motorreductor es considerablemente menor al de un stepper, lo que representa una ventaja.

Sin embargo, la principal diferencia radica en el control de cada motor y en el motivo para el cual fue diseñado cada uno. Si bien un stepper puede funcionar de manera continua con el control adecuado, no es la funcionalidad para la cual fue diseñado. Además, requiere de un driver especializado que implica costos adicionales tanto de dinero como de diseño. En cambio, un motorreductor DC se controla únicamente con una señal PWM, generada por cualquier

microcontrolador, atravesando previamente una etapa de potencia más simple que los drivers de los stepper. Por este motivo, se determinó que los motores que generarán el desplazamiento del equipo serán motorreductores DC.

12.1.2.6. Sensores de Corriente

A continuación, se analizarán dos tecnologías de sensores de corriente que podrán ser utilizadas tanto para implementar el observador de corriente de los motores de carga, como para realizar una protección de exceso de torque – corriente.

Parámetro	Transformador + Resistencia	Efecto Hall
Modelo	ZMCT103C	ACS7125A
Imagen		
Aislación galvánica	Si	Si
Rangos de corriente	Hasta 5A	Hasta 6A
Sensibilidad	1A/1mA (Sin contar resistencia)	0.1 – 0.7 V/A
Medición corriente DC	No	Si
Medición corriente AC	Si	Si
Costo aproximado	US \$3	US \$3.50

Tabla 30 Comparación de las tecnologías de sensores de corriente

Se puede observar que las características de ambas tecnologías son muy similares, siendo la principal diferencia la imposibilidad de medir corrientes constantes con el transformador. Es por esta razón que se optará por utilizar sensores de efecto Hall.

12.1.3. DFMA

N°	Efectos de la falla	Modo de la falla	Causas de la falla	Aceptabilidad				Accion de prevencion	Aceptabilidad				Referencia	Umbral de IC		
				NS	PO	DE	IC		NS	PO	DE	IC		Acceptable	< 27	
Sensores de proximidad																
1	La cortadora no puede completar el recorrido	La cortadora se traba con un obstaculo y no se puede mover	El sensor de proximidad no detecta el obstaculo	4	3	3	36					0			Bajar si es posible	27 < <48
2	La cortadora no puede completar el recorrido	La cortadora queda quieta en el lugar al detectar obstaculos de manera permanente	La tecnologia de sensado posee errores sistematicos que son detectados como obstaculos	4	3	3	36					0			No aceptable	> 48
3	La cortadora parece detectar obstaculos donde no los hay, no pudiendo cortar todo el predio	Lecturas inexactas por parte del sensor de proximidad	Falla mecanicas en los sensores fin de carrera	3	3	4	36	Se coloca una advertencia en las especificaciones del producto	4	2	3	24				
4	La cortadora no puede completar el recorrido	La cortadora queda quieta en el lugar al detectar obstaculos de manera permanente	Sensor infrarojo obstruido por suciedad	5	4	2	40	Se coloca una advertencia en las especificaciones del producto	5	4	1	20				
Seguridad																
5	El usuario sufre lesiones severas	La cortadora no frena la cuchilla al ser levantada o volteada	Sensor de proximidad al suelo obstruido	5	3	2	30	Utilizacion de dos sensores, distribuidos en puntos alejados del chasis de la cortadora	5	2	2	20				
6	El usuario sufre lesiones severas	La cortadora no frena la cuchilla al ser levantada o volteada	Los cables del sensor de proximidad al suelo se desconectaron	5	2	3	30	Utilizacion de cables flexibles, con un conexionado mecanico que soporte las vibraciones.	5	1	3	15				
7	Electrocución	El operador recibe choque eléctrico	Fallas en aislaciones del equipo	5	3	5	75	Aislacion reforzada en la parte de potencia electrica.	5	1	5	25				
8	Electrocución	El operador recibe choque eléctrico	Modificación del equipo por parte del usuario	5	3	5	75	Se coloca una advertencia en las especificaciones del producto	5	1	5	25				
9	El usuario sufre lesiones severas	El operador recibe un corte o lastimadura	Modificación del equipo por parte del usuario	5	3	5	75	Se coloca una advertencia en las especificaciones del producto	5	1	5	25				
Alimentación																
11	Se disminuye considerablemente la vida util de la batería y el producto no funciona	La corriente exigida a las baterias es muy grande	Los contactos de la batería se ponen en cortocircuito	5	2	3	30	Utilizacion de fusibles y una etapa de control dentro del modulo de baterias	5	2	1	10				
12	Inoperabilidad del producto	El equipo queda sin alientación	Los contactos de la batería se desconectaron	5	3	2	30					0				

Figura 21 DFMA

12.2. Factibilidad de Tiempos

12.2.1. Diagrama de PERT del proyecto

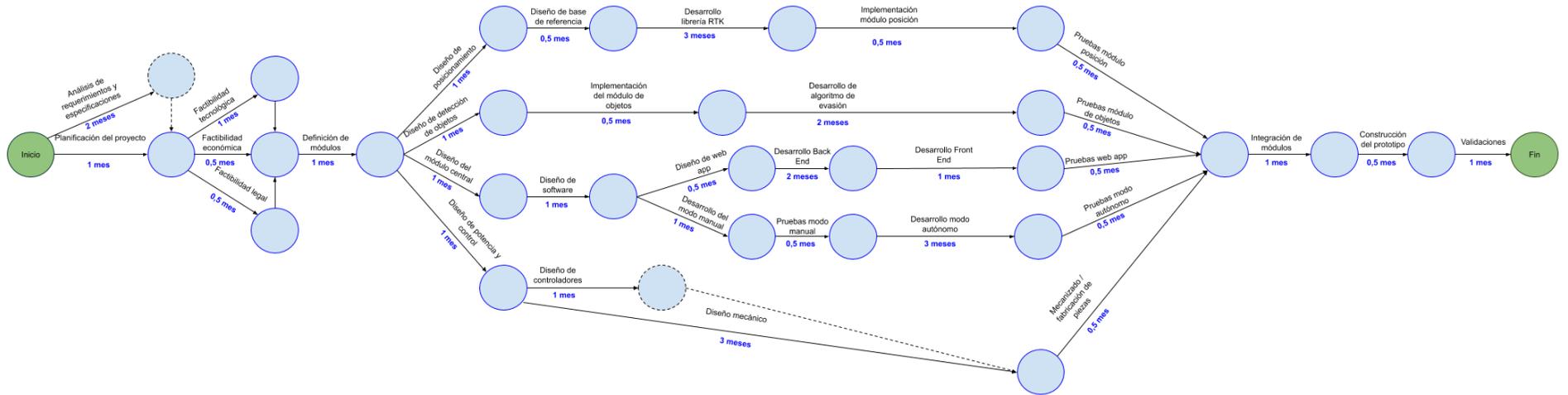


Figura 22 Diagrama de PERT

12.2.2. Diagrama de Gantt para el diseño y desarrollo del prototipo

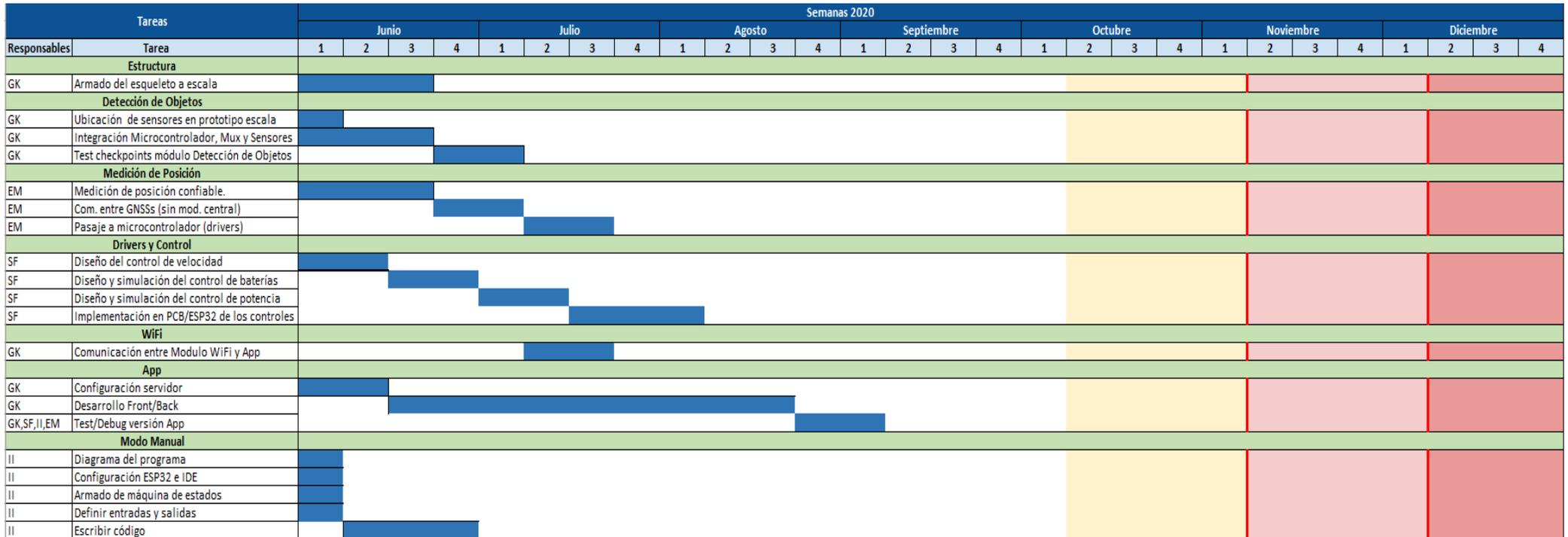


Figura 23 Gantt (primera parte)

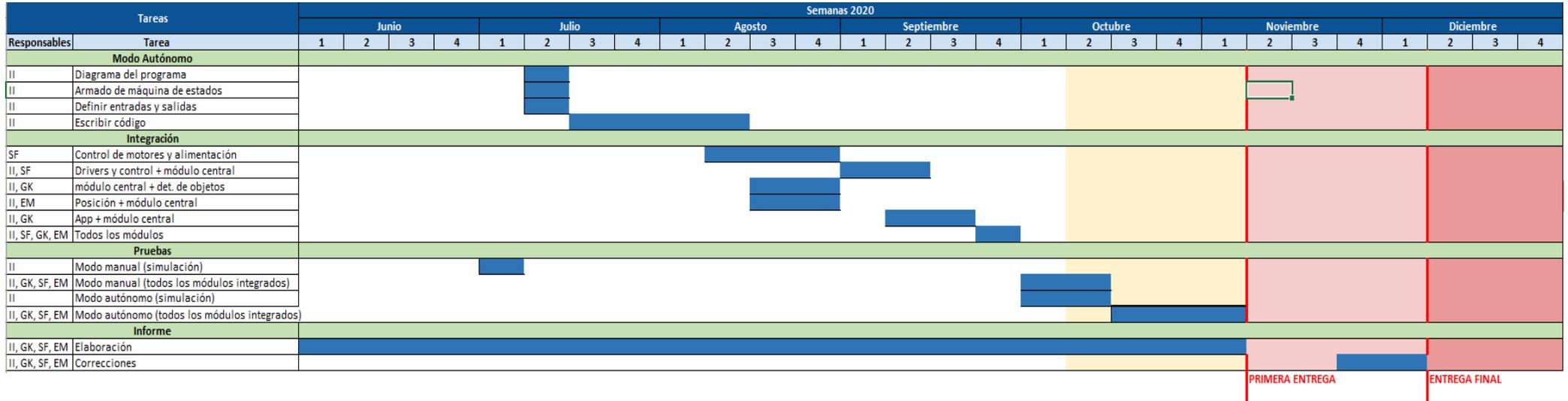


Figura 24 Gantt (segunda parte)

12.3. Factibilidad económica

12.3.1. Modelo de negocios, ciclo de vida y análisis de mercado

El modelo de negocios a implementar consiste principalmente en ventas online del producto directamente al consumidor a través de un sitio web propio y de plataformas de venta como Mercado Libre o similares. El costo del envío correrá por cuenta del cliente y se utilizarán medios propios para envíos dentro del AMBA (CABA y GBA) y el Correo Argentino para envíos al interior. Se prevé escalar el negocio en una segunda etapa e ingresar al mercado minorista mediante acuerdos con comercios de jardinería y de equipamiento para el hogar.

El análisis de mercado se basa en el *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2010)*¹ y la *Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (2017-2018)*², documentación pública y accesible ubicada en el sitio web oficial del INDEC.

Si bien el censo es del año 2010, para el análisis se asume que la relación entre población total, cantidad de casas y promedio de personas por casa se mantiene constante y se estiman los datos correspondientes al año 2020.

Censo Nacional 2010			
Población país	Población que vive en casas	Cantidad de casas	Personas por casa
39.672.520	32.992.266	8.930.534	3,69

Tabla 31 Datos del Censo Nacional 2010

Población (INDEC) y datos estimados año 2020			
Población país	Población que vive en casas	Cantidad de casas	Personas por casa
45.376.763	37.736.001	10.214.595	3,69

Tabla 32 Datos estimados 2020

Dado que el producto diseñado tiene un costo elevado para el usuario y requiere de casas con jardines, se estima que únicamente podrán acceder al mismo los hogares con ingresos superiores a \$100.000 mensuales. La Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares indica que el 11,2% de los hogares cuenta con semejante poder adquisitivo. Con ese número y asumiendo un alcance del 10% a esos hogares, se obtiene un número estimado de potenciales clientes.

¹ <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>

² <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-4-45-151>

Cantidad de casas con ingresos mayores a \$100.000	Cantidad de clientes potenciales
1.144.035	114.403

Tabla 33 Hogares dentro del rango ABC-1 y C2.

El diseño del producto fue realizado siempre orientado a la escalabilidad y mejora continua. Esto, sumado a la gran cantidad y velocidad de avances tecnológicos, permitirá el desarrollo de nuevas versiones y distintas mejoras de manera constante. Por este motivo, se estima que el ciclo de vida del producto será de 3 años con una renovación del 50% de los clientes. Es decir, cada tres años uno de cada dos clientes comprará un nuevo modelo.

12.3.2. Costos

Costo de fabricación por unidad			
Aluminio para chasis y adaptadores	US\$ 35,42	RaspberryPI	US\$ 10
Mecanizado de chasis y piezas	US\$ 98	Sensores IR	US\$ 15,7
Motor de corte	US\$ 17,9	Sensores FC	US\$ 2
Ruedas traseras (2 unidades)	US\$ 15,4	Bulones, tornillos, arandelas y cables	US\$ 1,7
Motores de movimiento (2 unidades)	US\$ 22,32	Resistencias, capacitores, LEDs y transistores	US\$ 0,47
Rueda delantera	US\$ 0,85	Carcasa y ploteo	US\$ 20
Baterías (2 unidades)	US\$ 28,66	IMU	US\$ 2
ESP32 (3 unidades)	US\$ 30	Puentes H	US\$ 6
Módulo GNSS (2 unidades)	US\$ 155	Componentes varios	US\$ 22,73
Total	US\$ 484,15		

Tabla 34 Detalle de costos de una unidad

Con el costo total estimado para cada unidad, es posible validar la siguiente especificación:

IMP-COS-01	El costo de fabricación del producto no deberá superar los US \$500.
------------	--

Para calcular el costo de instalaciones, se evaluó el precio de alquileres de espacios de oficinas y depósitos con superficies entre 100 y 200 m². Por precio y accesos, se determinó que lo más conveniente sería alquilar dentro del Gran Buenos Aires, y se tomó el valor promedio de las distintas ofertas viables para el desarrollo del proyecto.

El costo de equipamiento se determinó tras relevar los precios de todo lo necesario para poder fabricar el producto. Esto incluye osciloscopios, soldadores, herramientas adecuadas, fuentes de alimentación, multímetros, tacómetros, computadoras y el amueblado necesario para desarrollar el ambiente de trabajo.

Por último, para los costos de personal, se consideran los salarios de los cuatro autores de este informe y se planea, en una etapa inicial, la contratación de dos técnicos mecánicos / electrónicos y un empleado administrativo. Se toma el salario actual promedio para ingenieros, técnicos y personal administrativo del mercado argentino y se suman para obtener los gastos iniciales. A medida que avance el proyecto, se prevé incorporar personal adicional.

Costos de instalaciones	
Equipamiento inicial	US\$ 12.400
Alquiler (anual)	US\$ 8.520

Tabla 35 Costos de instalaciones estimadas

Costos anuales de personal	
Ingenieros (x4)	US\$ 47.440
Técnicos (x2)	US\$ 15.630
Administrativo (x1)	US\$ 7.570

Tabla 36 Costos anuales de personal estimados

Los costos de personal indicados son los iniciales, pero se pretende aumentar el personal cada tres años a medida que aumenten las ventas. Por último, para el gasto en publicidad se pretende destinar el 8% de los ingresos esperados por venta en cada año (monto recomendado por la “*US Small Business Administration*”). Como el cálculo se realiza en base a las ventas de cada año, se considera dentro de los costos variables. Las proyecciones de ventas para los primeros 10 años se encuentran detalladas en el Anexo del informe.

12.3.3. Ingresos

Se decidió establecer un precio de venta de US\$ 1.000, lo cual resulta competitivo ya que el resto de los productos similares del mercado tienen valores superiores a US\$ 1.500. Además, se cumple de esta forma con el requerimiento REQ-07 y se obtiene un margen alrededor del 100% con respecto al costo de fabricación de cada unidad. Se asume una inversión inicial en el año 0 de US\$ 100.000 de capital propio.

12.3.4. Flujo de fondos y rendimiento

Año	Ventas estimadas (unidades)	Costos Fijos (US\$)	Costos Variables (US\$)	EBITDA (US\$)	Resultado Neto (US\$)
0	-	91.560	-	-91.560	-91.560
1	240	79.160	142.560	18.280	12.604
2	253	79.160	150.282	23.558	16.243
3	267	79.160	158.598	29.242	20.162
4	289	89.352	177.446	22.202	15.308
5	313	89.352	192.182	31.466	21.696
6	339	89.352	208.146	41.502	28.616
7	376	99.544	238.384	38.072	26.251
8	418	99.544	265.012	53.444	36.850
9	464	99.544	143.920	70.280	48.458

Tabla 37 Flujo de ingreso para los primeros 10 años.

Año	Flujo acumulado de fondos (US\$)
0	-91.560
1	-78.956
2	-62.713
3	-42.551
4	-27.243
5	-5.574
6	23.069
7	49.320
8	86.170
9	134.628

Tabla 38 Flujo acumulado de fondos para los primeros 10 años

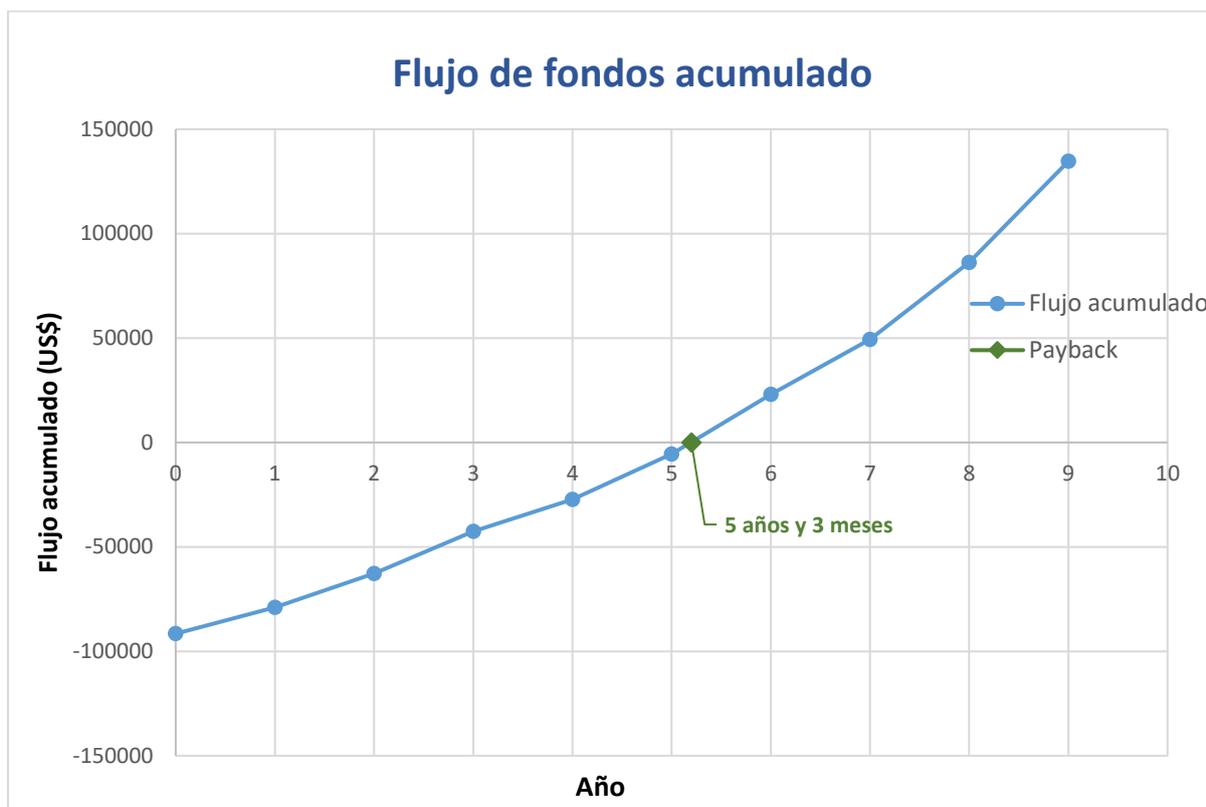


Figura 25 Flujo de ingresos acumulado para los primeros 10 años

Para el cálculo de resultado neto, se consideraron los siguientes impuestos:

1. IIBB 5%
2. IVA 10,5% (productos electrónicos)
3. Ganancias 25% (SAS)

Tomando los flujos de caja de cada año se obtienen las variables que permiten evaluar el proyecto:

- TIR = 18%
- VAN = US\$ 112.395(*)
- Payback: 5 años y 3 meses

(*) Para el cálculo del VAN se utilizó una tasa de descuento de 1,75%, siendo esta el valor medio del rendimiento de la última década de los bonos del tesoro de Estados Unidos.

Al verificar que el VAN es mayor a cero, se determina que el proyecto es viable. De esta forma, se concluye que el precio establecido para el producto es correcto y se valida la siguiente especificación:

IMP-COS-02	El precio de venta del producto deberá ser igual o menor a US \$1000.
------------	---

12.4. Factibilidad legal

12.4.1. Organización Societaria

Para producir la cortadora de césped, se propone crear una Sociedad Anónima Simplificada (SAS) ya que se cuenta con los siguientes **beneficios**³:

1. El costo de constitución es de dos salarios mínimos vitales y móviles.
2. Es posible aumentar el capital inicial hasta un 50% sin necesidad de publicar edictos ni registración. Esto facilitaría la incorporación de inversores adicionales en caso de ser necesario.
3. Se permiten distintas clases de acciones (ordinarias, preferidas o escriturales), lo que no sucede con una SRL.
4. 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.
5. Se promueve la digitalización de las inscripciones societarias, así como las notificaciones por la misma vía, lo que acelera significativamente todos los plazos de registración y modificaciones estatutarias. A la inscripción, se obtiene la Clave Única de Identificación Tributaria (CUIT) online.
6. La alícuota del impuesto a las ganancias es del 25% para todas las SAS.

12.4.2. Patentamiento

La cortadora de césped autónoma diseñada se encuentra en condiciones a ser patentada como Patente de Invención según la Ley de Patentes de Invención y Modelos de Utilidad (Ley N°24.481). Esto es posible dado que se cumplen los tres requerimientos mínimos que solicita la ley:

- **Novedad:** El producto implica una novedad por el precio al consumidor, porque no es necesaria una instalación especializada y por el algoritmo de recorrido para realizar el corte de la superficie delimitada. En la actualidad, todos los productos similares de cortado autónomo de césped requieren de una instalación a realizar por un técnico especializado (por lo general mediante el cableado del área a cortar) y realizan un recorrido aleatorio para cortar el césped.
- **Actividad Inventiva:** La ley 24.481 establece: “Que un producto presente actividad inventiva significa que el objeto de la invención no se deduzca en forma evidente por una persona con conocimientos medios en la materia referente a la tecnología del producto o procedimiento a patentar”. La cortadora de césped diseñada presenta actividad inventiva en la medición de la posición mediante el protocolo RTK utilizando mediciones diferenciales de GPS, además del algoritmo de recorrido a través de objetivos en lugar de un recorrido aleatorio.
- **Actividad Industrial:** El proceso de cortado de césped puede realizarse de manera repetitiva y es escalable para satisfacer las necesidades de distintas industrias, además de ser un producto para consumidores particulares.

³ <http://dicosc.com.ar/sas-13-beneficios-de-este-nuevo-tipo-de-sociedad/>

Con el cumplimiento de estos tres puntos, es posible presentar la documentación frente al INPI e iniciar el proceso de patentamiento

12.4.3. Garantías: Ley de Defensa del Consumidor (Ley N°24.240)

Al comercializar este producto, se debe tener en consideración la Ley de Defensa del Consumidor (Ley N°24.240) y en el caso de un incumplimiento se aplicarán las sanciones correspondientes. Debido al diseño visto en otras secciones que cumplen con el REQ-20 minimiza los riesgos a una denuncia a Defensa del Consumidor.

El Artículo 11 establece lo siguiente:

‘Garantías. Cuando se comercialicen cosas muebles no consumibles conforme lo establece el artículo 2325 del Código Civil, el consumidor y los sucesivos adquirentes gozarán de garantía legal por los defectos o vicios de cualquier índole, aunque hayan sido ostensibles o manifiestos al tiempo del contrato, cuando afecten la identidad entre lo ofrecido y lo entregado, o su correcto funcionamiento.

La garantía legal tendrá vigencia por TRES (3) meses cuando se trate de bienes muebles usados y por SEIS (6) meses en los demás casos a partir de la entrega, pudiendo las partes convenir un plazo mayor. En caso de que la cosa deba trasladarse a fábrica o taller habilitado el transporte será realizado por el responsable de la garantía, y serán a su cargo los gastos de flete y seguros y cualquier otro que deba realizarse para la ejecución de este.’

12.4.4. Daños: Responsabilidad Civil y Ley de Seguros (Ley N°17.418)

La cortadora autónoma de césped tendrá un manual de uso con todas las advertencias e indicaciones más importantes con respecto a la seguridad de instalación, uso y de mantenimiento que no requiera un agente especializado. El usuario deberá leer dicho manual antes de usar la cortadora por primera vez. Es posible que no se respeten las instrucciones explícitas para evitar algún daño y por este motivo se considera el Código Civil y Comercial de la nación, la responsabilidad civil y la Ley de seguros (LEY N°17.418). Aun siendo detallados en el manual de uso (en caso de que haya un accidente) existe la posibilidad de que el usuario inicie una causa por daños y perjuicios. Por este motivo, para mitigar los posibles riesgos se contará con un contrato de seguro de una aseguradora para resarcir los daños que puedan generarse o cubrir las contingencias derivadas de un evento imprevisto. Se tomará de referencia las siguientes normas ISO para el diseño de la armadura:

- ISO 12100:2010(en): Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction
- ISO 8380:1993(en): Forestry machinery — Portable brush-cutters and grass-trimmers — Cutting attachment guard strength
- ISO 7918:1995(en): Forestry machinery — Portable brush-cutters and grass-trimmers — Cutting attachment guard dimensions

La cortadora autónoma de césped deberá tener por lo menos las siguientes leyendas:

- ADVERTENCIA – Leer el manual de instrucciones antes de operar la máquina.
- ADVERTENCIA – Mantener una distancia segura mientras la maquina está en operación.
- ADVERTENCIA – No se suba a la máquina.

- ADVERTENCIA – Apague o deshabilite la maquina antes de levantarla o manipularla.
- PRECAUCIÓN – No tocar la herramienta de corte.

La web app desarrollada deberá tener por lo menos las siguientes leyendas:

- ADVERTENCIA – Leer el manual de instrucciones antes de operar la máquina.
- ADVERTENCIA – Mantener una distancia segura mientras la maquina este en operación.

12.4.5. Grado de protección IP66 (Norma IEC 60529)

El producto deberá cumplir el estándar IP66 por lo cual se toma de referencia los requisitos descriptos en la norma IEC60529 para cumplir dicho estándar. Las clasificaciones de Protección de Ingreso (IP) son desarrolladas por el Comité Europeo de Estandarización Electrotécnica (CENELEC) (NEMA IEC 60529 Grados de Protección Proporcionados por Envoltentes – Código de IP), que detalla la protección ambiental que proporciona un gabinete.

IP generalmente tiene dos números, cuanto más alto sea cada número, mayor será la protección contra objetos sólidos o protección contra líquidos (agua). Para este caso IP66 corresponde a la protección contra objetos sólidos siendo protección total contra el polvo (6) y a la protección contra chorros de agua de alta potencia (boquilla de 12.5 mm) desde todas las direcciones respectivamente (6).

12.4.6. Certificación obligatoria (Resolución 171/16)

En Argentina está vigente una resolución de cumplimiento obligatorio que exige que todos los productos eléctricos y electrónicos que se comercializan dentro del territorio nacional cuenten con un certificado del cumplimiento de los requisitos de seguridad esenciales emitido por un organismo de certificación de productos. Los organismos de certificación habilitados para operar en este sistema obligatorio deben estar acreditados por el OAA y reconocidos por el Gobierno Nacional. 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).

La cortadora autónoma de césped se encuentra dentro de la familia de productos tales como cortadoras de césped, bordeadoras y sopladoras eléctricas. Esta familia conforma el Sistema Marca de Conformidad (Sistema N°5) por lo cual a partir de la vigencia de la resolución, los controles de vigilancia de los productos certificados conforme a lo establecido por esta resolución y los de aquellos certificados que se encuentren actualmente vigentes, constarán al menos de una verificación anual a partir de la fecha de la emisión del certificado o de la última actividad de vigilancia, del cumplimiento de las características básicas de seguridad, determinadas por tipo de producto según la norma aplicable, a través de ensayos realizados por un Laboratorio de Ensayo reconocido sobre UNA (1) muestra representativa de la familia de productos y al menos una inspección con una frecuencia mínima anual a realizarse en las plantas responsables de la fabricación, que incluirá la evaluación del sistema de calidad de la planta productora así como los productos objeto de la certificación.

Para cada vigilancia, las muestras representativas serán tomadas de los comercios y del depósito de producto terminado de fábrica para productos nacionales o del depósito del importador para productos de origen extranjero alternativamente e iniciando la toma de muestra en el comercio. Dicha alternancia deberá ocurrir en el plazo de UN (1) año.

Según el siguiente artículo de la resolución 171/2016:

‘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 dicroicas 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 electros 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;’

Por el tipo de diseño de la cortadora autónoma y la utilización de baterías, la cortadora autónoma de césped no deberá someterse a una certificación al operar a una tensión inferior de los CINCUENTA VOLT (50 V).

13. Estudios de Confiabilidad

13.1. Diagrama de confiabilidad (Hardware)

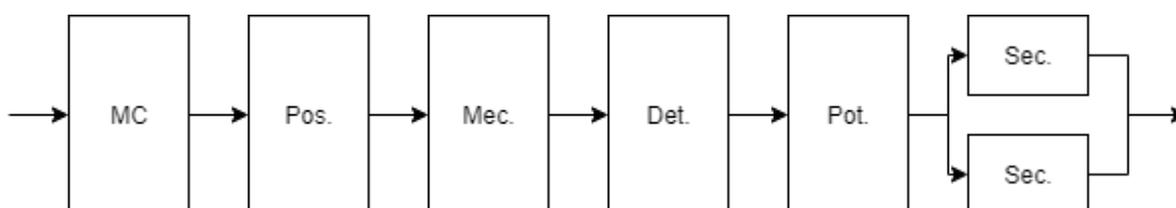


Figura 26 : Diagrama de confiabilidad. En orden de izquierda a derecha: módulo central (MC), posicionamiento (Pos.), mecánica (Mec.), detección de objetos (Det.), potencia (Pot.) y seguridad (Sec.).

La figura anterior muestra el diagrama de confiabilidad del dispositivo. Cada uno de los bloques hace referencia a un módulo principal de este, sin el cual el equipo no sería capaz de funcionar adecuadamente (por lo tanto, se encuentran todos en serie). Se procederá a analizar cuál es la

confiabilidad de cada uno de esos módulos, obteniendo su respectivo lambda, su confiabilidad (R(t)) y si tiempo medio entre fallas (MTBF).

13.2. Confiabilidad de hardware

Se utilizará la norma militar MIL-HDBK-217F para el cálculo de los parámetros de confiabilidad previamente mencionados. Si bien la fórmula exacta de la confiabilidad de cada elemento depende de la naturaleza en sí de este, todos comparten un elemento en común siendo el λ_p , el cual representa la cantidad de fallas esperada en un millón de horas, es decir, $\frac{fallas}{10^6 \text{ horas}}$. La fórmula exacta para su obtención es aquello que se busca en la norma mencionada. Para la función de confiabilidad, se utiliza:

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

Dado que se asume $\lambda_p(t)$ constante, y se corrige para medir t en horas, se obtiene:

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

Donde el tiempo debe ser medido en millones de horas. Finalmente se obtiene el tiempo medio entre fallas (MTBF) en horas como:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \frac{10^6}{\lambda_p}$$

Para este análisis se tomarán siempre condiciones normales de presión y temperatura y en los casos que haya que determinar factores no disponibles hasta el momento se tomará el peor caso.

13.2.1. Módulos a analizar

En cada uno de los siguientes módulos se presentan las tablas con los coeficientes necesarios para calcular el λ_p . A menos que se indique explícitamente lo contrario, se asume que todos los componentes dentro de un módulo son críticos, por lo que el fallo de tan solo uno de ellos representa una falla en todo el equipo. Al ser considerados de esta manera, la talla de fallos del módulo es la suma de la tasa de fallos de cada componente.

- Potencia

Submódulo	Elemento	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_A	π_V	π_C	π_{SR}	λ_p
Fuente Buck	Diodo	0.003	1.2	9	5.5	0.19			1		0.0339
	MOSFET	0.06	1.1	5	5						1.65
	Inductor	$3 * 10^{-5}$	1.1	12	10		0.7				0.0028
	Capacitor	$1.2 * 10^{-4}$	1.3	20	10			1	1.6	1	0.2

Tabla 39 Confiabilidad de la etapa de potencia – fuente Buck

Submódulo	Elemento	π_T	π_E	π_Q	C_1	C_2	π_L	λ_p
Regulador 5V	LM7805	0.15	4	10	0.01	0.001	1	0.055

Tabla 40 Confiabilidad de la etapa de potencia - regulador 5V

$$\lambda_{p,Pot.} \approx 1.94 \frac{fallas}{10^6 horas}$$

- Mecánica

Elemento	A	B	λ_1	λ_2	α_W	α_B	#	λ_p
Motor DC	1.9	1.1	1	0.13	$8.9 * 10^5$	78000	2	13.76
Motor Brushless	1.9	1.1	1	0.13	$8.9 * 10^5$	78000	1	6.88

Tabla 41 Confiabilidad de la etapa de mecánica

$$\lambda_{p,Mec.} \approx 20.64 \frac{fallas}{10^6 horas}$$

- Detección de objetos

Submódulo	Elemento	λ_b	π_T	π_E	π_S	π_R	π_Q	π_A	#	λ_p
Sensor IR	IR Tx LED	.00023	1.2	8			8		15	0.26
	IR Rx Photo-Transistor	.0055	1.2	8			8		9	3.38
	BJT	.00074	1.1	9	0.16	0.43	8	0.7	3	$8.47 * 10^{-3}$
	Resistencia	0.0037	1.1	16	0.58		10		6	2.27

Tabla 42 Confiabilidad de la etapa de detección de objetos – sensores IR A

Submódulo	Elemento	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_A	π_L	π_V	π_C	π_{SR}	C_1	C_2	#	λ_p
Sensor IR	Capacitor	$1.2 * 10^{-4}$	1.3	20	10			1	1.6	1			3	0.4

	MUX		0.42	4	0.25	1	1.2				25	0.0087	1	3.16
--	-----	--	------	---	------	---	-----	--	--	--	----	--------	---	------

Tabla 43 Confiabilidad de la etapa de detección de objetos - sensores IR B

Submódulo	Elemento	λ_b	π_T	π_E	π_S	π_Q	π_L	π_V	π_C	π_{SR}	#	λ_p
Fin de carrera	Switch	.10		18		2	1		1		3	10.8
	Resistencia	0.0037	1.1	16	0.58	10					3	1.03
	Capacitor	$1.2 * 10^{-4}$	1.3	20		10		1	1.6	1	3	0.6

Tabla 44 Confiabilidad de la etapa de detección de objetos - fin de carrera

$$\lambda_{p,Det.} \approx 21.91 \frac{fallas}{10^6 horas}$$

- Posición

Submódulo	Elemento	λ_{BD}	π_{MFG}	π_{VT}	π_{CD}	π_E	π_Q	π_{BP}	π_{PT}	λ_{EOS}	#	λ_P
Posición del vehículo	Sensor GPS	0.24	2.0	0.51	5.2	4.0	10	0.0026	1.3	0.065	2	2.94
Posición de la base	Sensor GPS	0.24	2.0	0.51	5.2	2.0	10	0.0026	1.3	0.065	2	2.81

Tabla 45 Confiabilidad de la etapa de posición

$$\lambda_{p,Pos.} \approx 5.75 \frac{fallas}{10^6 horas}$$

- Módulo central

Submódulo	Elemento	π_T	π_L	π_E	π_Q	C1	C2	#	λ_p
Procesador del vehículo	Microprocesador	0.42	2.0	4.0	5	.56	0.017	1	3.03
Procesador de la base	Microprocesador	0.42	2.0	2.0	5	.56	0.017	1	2.7

Tabla 46 Confiabilidad del módulo central

$$\lambda_{p,MC} \approx 5.73 \frac{fallas}{10^6 horas}$$

Debido a que todos los módulos son críticos para la operación del dispositivo, se puede representar la tasa de fallas del equipo completo como la suma de las tasas de fallas de cada módulo, por lo tanto:

$$\lambda_{p,total} = \sum_{k = \text{módulo}} \lambda_{p,k} \approx 55.97 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{horas}}$$

El tiempo medio entre fallas será:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \frac{10^6}{\lambda_p} \approx 1.79 \cdot 10^4 \text{ horas}$$

Y finalmente el la confiabilidad vendrá dada por la fórmula:

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

Mediante esta última fórmula es posible obtener el tiempo en el que se espera que falle un cierto porcentaje de las unidades. Denominamos dicho porcentaje como κ , y la función que representa el tiempo para que hayan hallado esa tasa es:

$$R(t) = 1 - \kappa = e^{-\lambda_p \cdot \frac{t}{10^6}}$$

$$t = \ln\left(\frac{1}{1 - \kappa}\right) \cdot \frac{10^6}{\lambda_p}$$

Para poder comprender la vida útil que representa las ecuaciones anteriores, consideraremos una cantidad media de cortes por semana de 1.5 (esto se debe a la que generalmente se corta el césped 2 veces por semana en verano, pero 1 vez por semana en otras estaciones), y con una duración de cada corte de 45 minutos, entonces se obtiene una utilización del dispositivo de 35 horas por año. Por lo que la vida la confiabilidad del producto en años de uso habitual cumple con la ecuación:

$$R(t_{\text{años de uso}}) = e^{-\lambda_p \cdot \frac{t}{10^6} \cdot 35}$$

En la figura a continuación, se puede observar la gráfica de la ecuación anterior.

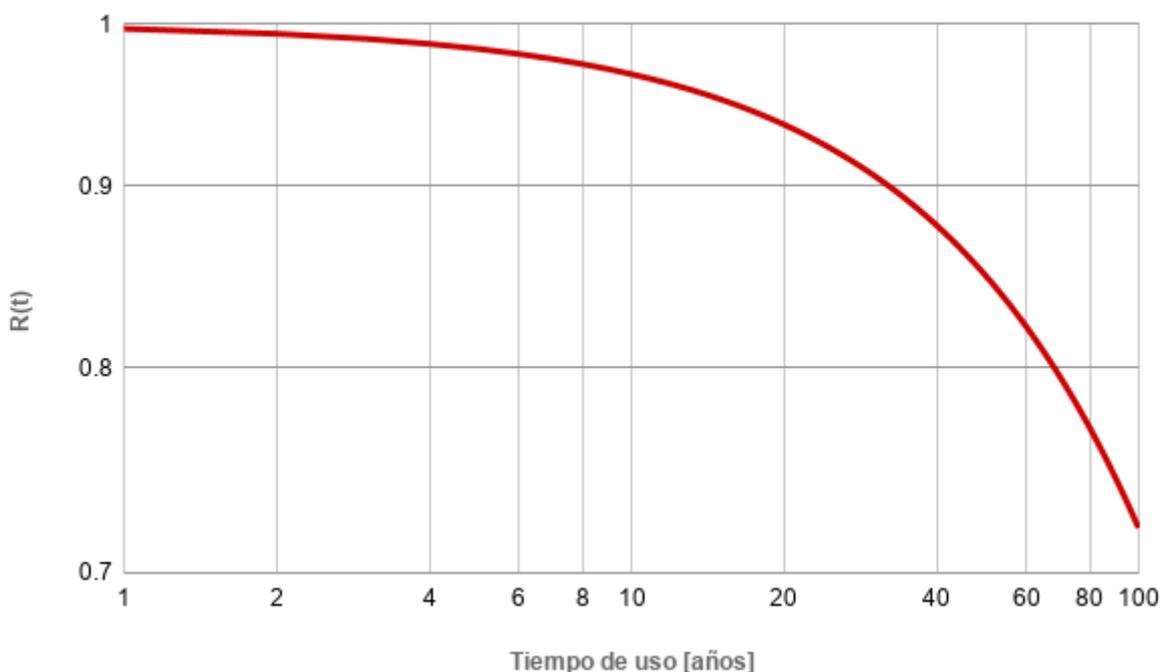


Figura 27 Confiabilidad en función del tiempo de uso. Se observa que para un $\kappa = 0.01$ se obtiene un tiempo de vida útil de 3 años aproximadamente, mientras que para $\kappa = 0.05$ el tiempo de vida útil aumenta a 15 años aproximadamente.

13.3. Confiabilidad del Software

En esta sección se realiza el análisis de confiabilidad de software, basado en el modelo de estimación de Shooman. Para este modelo, será necesario registrar las fallas detectadas y corregidas finalizada la etapa de desarrollo, como se explica a continuación.

13.3.1. Modelo de estimación

El modelo de estimación de confiabilidad de Shooman requiere que luego de la etapa de desarrollo de software, siga una etapa de depuración, en la que se dejará corriendo el software y se registrarán las fallas detectadas, con el objetivo de estimar la cantidad de fallas totales que posea el código y de esta manera estimar la tasa de fallas del software λ_e , para así obtener la curva de confiabilidad similar a la de hardware, es decir, exponencial de la forma:

$$R(t) = e^{-\lambda_e \cdot t}$$

Debe destacarse que a diferencia del hardware, el tiempo transcurrido es desde el inicio del programa, debido a que el software no posee desgaste por tiempo de uso, por lo que no se usa tiempo acumulado total.

Finalizada la etapa de desarrollo de hardware (ver sección 12.2.1), se contaron con 10 semanas para realizar la etapa de depuración, en donde las fallas de software se muestran en la tabla a continuación.

Semana	E_D	E_A	E_C	E_{CA}	E_R	Horas	λ	λ_1 / λ_2	E_T	k
1	30	30	12	12	18	168	0.179			
2	14	44	11	23	21	336	0.131	0.733		
3	13	57	12	35	22	504	0.113	0.864	111.0	0.155
4	6	63	13	48	15	672	0.094	0.829	111.0	0.155
5	8	71	12	60	11	840	0.085	0.902	169.9	0.080
6	3	74	5	65	9	1008	0.073	0.869	98.0	0.231
7	1	75	5	70	5	1176	0.064	0.869	103.1	0.200
8	3	78	5	75	3	1344	0.058	0.910	125.6	0.119
9	2	80	3	78	2	1512	0.053	0.912	109.0	0.178
10	1	81	2	80	1	1680	0.048	0.911	100.5	0.244

Tabla 47 Detección de errores

En esta tabla se puede observar semana a semana la detección de errores y la corrección de éstos, como también la tasa de fallas estimada semana a semana, y la cantidad de fallas totales estimadas.

E_D representa la cantidad de errores detectados en esa semana, y E_A la cantidad de errores acumulados desde la semana 1. Análogamente, E_C es la cantidad de errores corregidos en esa semana, y E_{CA} la cantidad de errores corregidos acumulados desde la semana 1. E_R es la cantidad de errores residuales, o aún no corregidos, y es la diferencia entre E_A y E_{CA} .

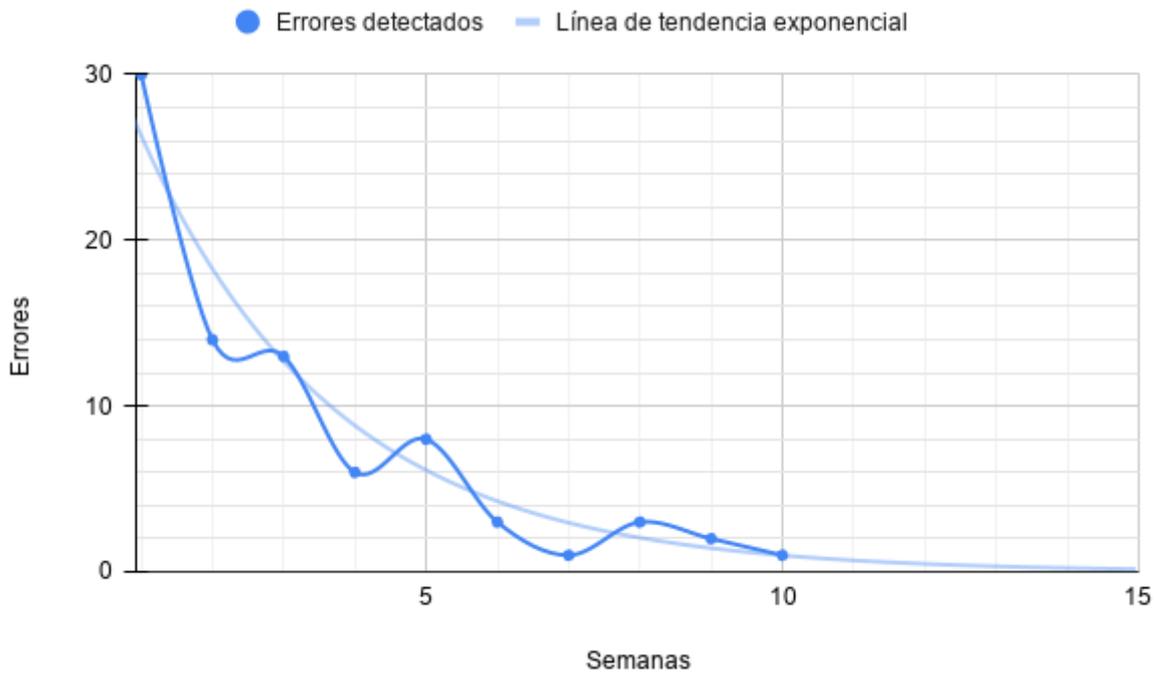


Figura 28 Errores detectados semana a semana, y su línea de tendencia

En base a lo observado en la figura anterior la siguiente se puede decir que a la décima semana el proceso de depuración se encuentra próxima a la estabilidad, y se puede hacer un estimación de la cantidad totales de errores en base al estado actual.

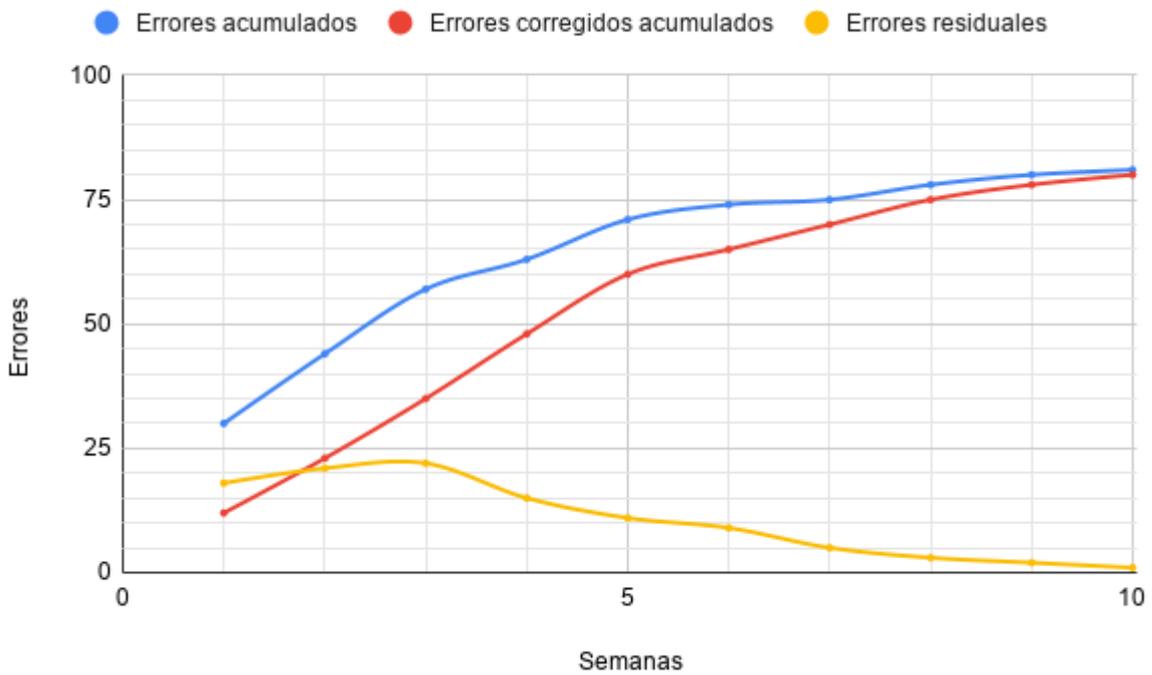


Figura 29 Errores acumulados, corregidos y residuales

Finalmente, \widehat{E}_T es la cantidad estimada total de errores, y se obtiene tomando dos semanas distintas (en la tabla se utiliza la semana actual y la semana anterior), y utilizando la fórmula:

$$\widehat{E}_T = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot E_{C_1} - E_{C_2}}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1}$$

En el modelo de Shooman se busca la tasa de fallas λ_e mediante la fórmula:

$$\lambda_e = k \cdot E_R / I_T$$

Donde I_T es la cantidad de líneas de software, y k viene dado por la ecuación:

$$k = \lambda_t \cdot \frac{I_T}{\widehat{E}_T - E_{CA_t}}$$

Siendo λ_t la tasa de fallos de una semana t .

Al cabo del final del proceso de depuración, se calcula con el k de la última semana la tasa de fallas total del sistema y se obtiene:

$$\lambda_e = 0.00235$$

Con un tiempo medio entre fallas, o MTTF:

$$MTTF = 426 \text{ horas}$$

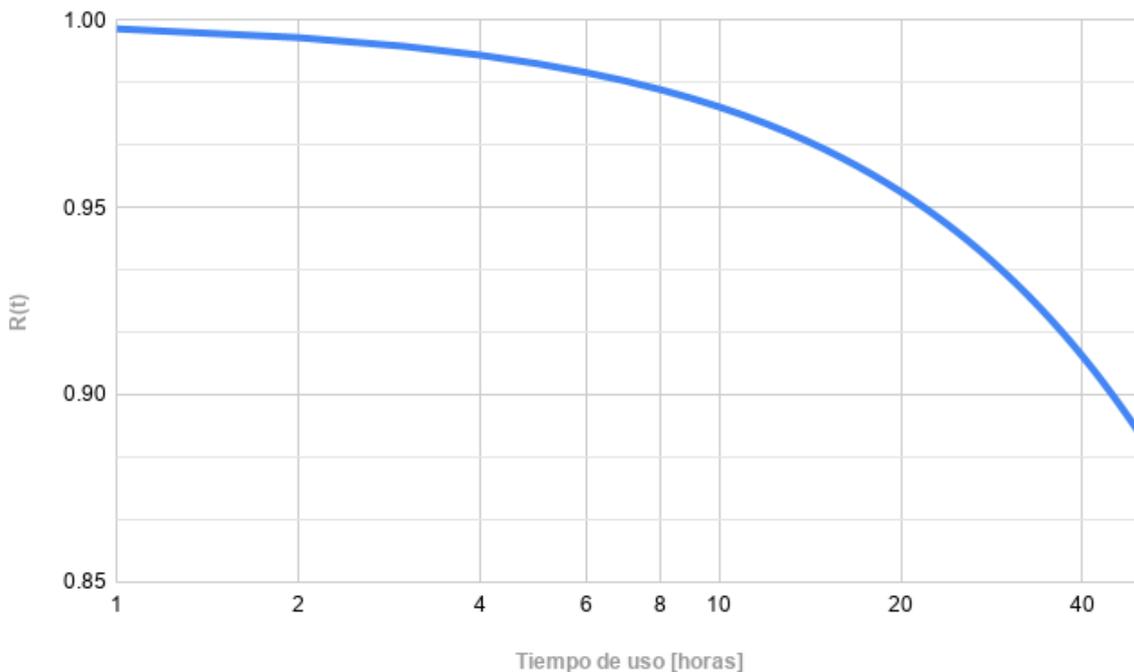


Figura 30 Confiabilidad de software

Se debe considerar que el tiempo de uso es desde el último reinicio del equipo, no tiempo acumulado de uso del producto, y dado que el tiempo de operación es aproximadamente 1 hora, como se ha visto en la sección 13.2, la confiabilidad total del producto (considerando software y hardware) estará limitada por el hardware. Por ejemplo, para que el software presente un problema considerable (confiabilidad menor al 95%), entonces el equipo deberá haber permanecido encendido una cantidad de tiempo considerablemente mayor al tiempo de uso adecuado (alrededor de un día entero). Por lo tanto, se tomará la confiabilidad de hardware como la representante de la confiabilidad total del producto.

14. Ingeniería en detalle

A continuación, se presentará la ingeniería en detalle del producto, realizando una subdivisión para cada bloque del producto, describiendo el diseño y desarrollo de cada módulo.

14.1. Descripción general de producto

El producto incorpora distintas tecnologías y algoritmos con diversos requerimientos de poder de procesamiento. Por lo tanto, se decidió diseñar el sistema de manera modular con diferentes subsistemas, cada uno con un microcontrolador dedicado para controlar sus tareas. Es importante remarcar que la unidad central del sistema (aquella unidad que maneja el flujo de datos, algoritmos y decisiones) será la unidad con conectividad wifi.

14.2. Hardware

14.2.1. Diagrama en bloques

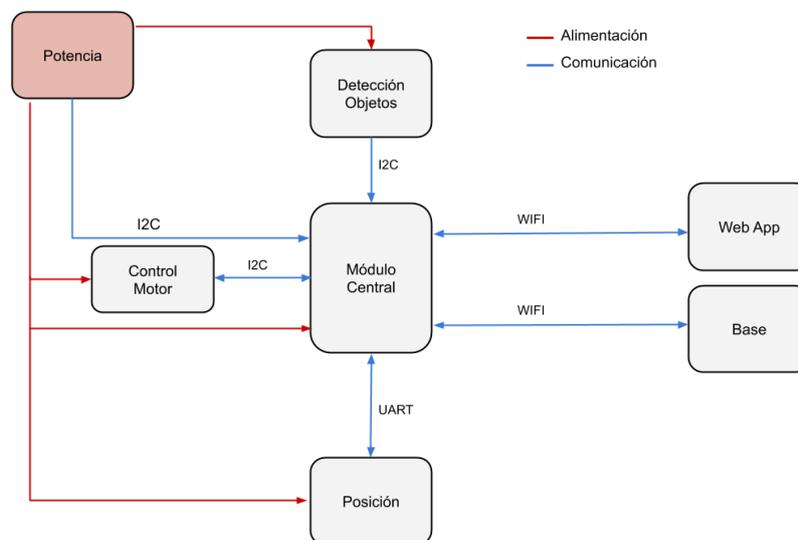


Figura 31 Diagrama en bloques del sistema completo

14.2.2. Motores

La cortadora cuenta con 3 motores, de los cuales 2 se encargan del movimiento de la cortadora sobre el césped y el tercero se encarga de cortar el mismo haciendo girar una tanza de plástico. Se elegirán los dos motores de movimiento iguales, con el fin de lograr la mayor simetría posible, no siendo así con el motor de corte, el cual tiene un conjunto de requerimientos distinto.

14.2.2.1. Motores de movimiento

Tal como se mencionó en las especificaciones y requerimientos IMP-OPE-01 y REQ-02 respectivamente, estos motores deben de trabajar a bajas RPM, pero con un torque suficiente para

poder mover los 15kg de peso máximo de dicha unidad. Teniendo esto en cuenta resulta lógica la selección de motorreductores como tecnología a utilizar.

Para la elección de estos motores, se toman como punto de partida dos datos provenientes del requerimiento REQ-02 (peso del equipo) y de las especificaciones IMP-OPE-01 (velocidades de operación) e INT-AMB-03 (coeficiente de fricción de rodado). Con el primero y el tercero respectivamente se obtiene el torque que deben poder ejercer los motores para permitir el movimiento del equipo.

Si bien el coeficiente de fricción de rodado fue tomado para un caso en el cual no debería funcionar el equipo (barro), se toma un coeficiente adicional de seguridad del 35% para asegurar el funcionamiento y poder cubrir los posibles errores de cálculo. Por lo tanto, se tomará el coeficiente que se indica a continuación:

$$p = 0,052 * 1,35 \approx 0,07$$

De esta forma, quedan definidas las variables a utilizar como punto de partida para el cálculo de los parámetros de los motores:

Variables		
V	0.25 m/s	Velocidad del equipo
R	5.75 cm	Radio de la rueda
ρ	0.07	Coeficiente de fricción
α	20°	Pendiente máxima tolerada
W	15 kg	Peso total máximo
G	98N	Fuerza peso
S	100 %	Factor de seguridad

Tabla 48 Variables utilizadas para la selección de los motores

La fuerza que deberán ejercer ambos motores en conjunto para mover el equipo es la siguiente:

$$Ft = P * p$$

La variable P es la fuerza peso correspondiente al equipo y p el coeficiente de fricción de rodado calculado anteriormente. Se tomará un peso inicial del equipo de 12kg y se usará ese valor para el cálculo de la fuerza Ft. En caso de que con este valor no se cumpla algún otro requerimiento o sea inviable para el armado del equipo, se iterará y utilizará otro valor más cercano a los 15kg (máximo posible).

Sin embargo, la fuerza planteada hasta el momento corresponde a la fuerza necesaria para desplazar el equipo sin ninguna inclinación, en terreno horizontal. Para poder cumplir con el requerimiento INT-AMB-01, se deben considerar los 20° de inclinación máxima en el cálculo de la

fuerza (representado como α). Se toma nuevamente un factor de seguridad S para contemplar cualquier error posible en el cálculo. El cálculo de la fuerza total se realiza de la siguiente manera:

$$F_t = P * (\text{sen}(\alpha) + p * \text{cos}(\alpha)) * S$$

Tomando $S = 100\%$, se obtiene:

$$F_t = 95,88N$$

Dado que la fuerza a ejercer por cada motor es la mitad de la total, se define dicha fuerza F :

$$F = \frac{F_t}{2} = 47,94N$$

Para calcular el torque necesario del motor, se toma el radio de las ruedas traseras, ya que es a través de las mismas que se transforma el torque en fuerza. La elección de dichas ruedas se detalla en la próxima sección. Las mismas son de diámetro de 11cm.

Por lo tanto:

$$\tau = r * F = 47,94N * 0,055m$$

$$\tau = 2,64Nm = 25,84 \text{ Kg}f * cm$$

Por otro lado, la especificación IMP-OPE-01 impone restricciones en cuanto a la velocidad de giro que debe tener el motorreductor. Considerando nuevamente las ruedas de diámetro de 11cm, se obtiene que la velocidad de giro debe ser:

$$n = \frac{0,25m/s}{0,055m * 2\pi} = 65,14 \text{ RPM}$$

El torque y la velocidad son parámetros suficientes para elegir el motorreductor adecuado que cumpla con los requerimientos y especificaciones. Un tercer factor para tener en consideración es el precio de dichos elementos, ya que el requerimiento IMP-COS-01 implica minimizar el costo del producto. En base a esto, se realizó una búsqueda de proveedores nacionales y se eligió a la empresa Ignis como la adecuada en cuanto a productos y precios. Dentro del catálogo de esta, se destacan cuatro modelos de motorreductores que merecen un análisis más detallado ya que sirven para la implementación del producto final y el prototipo. Estos son los modelos:

1. MR10D-024050
2. MR08D-024022
3. MR10B-024022
4. MR10B-024029

Para evaluar las distintas características, se fijó un precio máximo de US\$ 50 para cada motor con el objetivo de cumplir con el presupuesto requerido. Con este valor y la velocidad y torque previamente calculados, se realizó una detallada comparación entre los cuatro modelos y se confeccionó la siguiente tabla a modo de resultado:

	EXCEDEN	CUMPLEN	NO CUMPLEN
RPM		MR08D-024022	
		MR10B-024022	
	MR10D-024050		0
	MR10B-024029		0
TORQUE		MR08D-024022	
		MR10B-024022	
	MR10D-024050		0
		MR10B-024029	
PRECIO	MR08D-024022		0
			MR10B-024022
			MR10D-024050
			MR10B-024029

Tabla 45 Comparación de motores

El criterio de clasificación se basó en tres escenarios distintos. En caso de que no se llegue al requerimiento de velocidad, fuerza o precio (los primeros dos menores y el tercero mayor a lo requerido), se clasifica como “NO CUMPLEN”. En caso de exceder por más de un 20% el valor requerido, se clasifica como “EXCEDEN”, y todos los casos intermedios se clasifican como “CUMPLEN”. Cabe recordar que los cálculos de fuerza y velocidad ya tienen incorporados distintos factores de seguridad, por lo que aquellos clasificados como “CUMPLEN” no implican ningún riesgo a la hora de la implementación con respecto a errores en los cálculos o valores cercanos al límite.

Observando la tabla, se puede comprobar que el único modelo de motorreductor que cumple con los tres requerimientos de torque, velocidad y precio es el MR08D-024022, y es el que se usará tanto en el prototipo como en el producto final. El mismo cuenta con las siguientes características, según se indica en su hoja de datos:

Alimentación	24VDC
Is	6.5 A
Inom	1.5 A
Reducción	96:1
Velocidad nominal	67 RPM
Torque	27.22 Kg*cm
Largo total	139.6 mm
Peso	0.3 Kg
Precio	US \$24.5

Tabla 49 Características del motor a utilizar

14.2.2.2. Control de motores de movimiento

Conocer la velocidad de los motores es de suma importancia a la hora de trabajar en conjunto con un sistema de posicionamiento. Sin embargo, debido a que no se tiene acceso al eje de altas revoluciones del motorreductor, y las bajas RPM provenientes del eje de las ruedas, utilizar un encoder requiere que el mismo sea de mucha precisión, lo cual excede el presupuesto disponible para el control.

Como solución, se optó por realizar un control por espacio de estados para cada motor, donde se utilizará la corriente de cada uno como observador del sistema, lo que permitirá estimar la otra variable de estado, es decir, la velocidad angular.

Este control se basa en el funcionamiento de los motores DC, los cuales pueden ser modelados de la siguiente manera

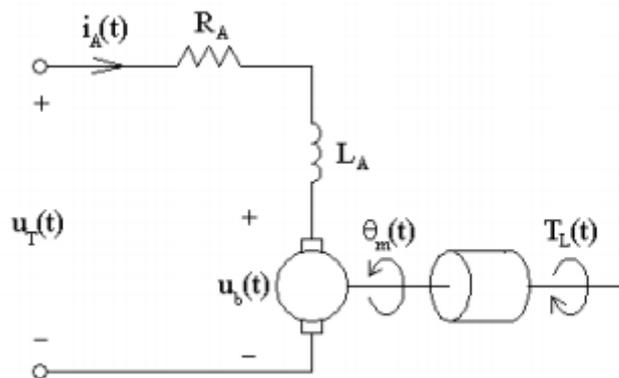


Figura 32 Modelado de un motor DC

La variable R es la resistencia de la armadura, B el índice de fricción viscosa, L la inductancia de la armadura, K la constante de EMF y J la inercia del rotor.

Tomando i (corriente de entrada) y w (velocidad angular del rotor) como variables de estado, se obtiene un sistema de una entrada y una salida, cuya entrada es la tensión aplicada al motor y su salida es la corriente entregada por dicha tensión. Si bien la lógica indicaría que la salida sean las revoluciones por minuto del rotor, es decir, la variable que se desea controlar, esta variable resulta difícil de medir de manera efectiva por los motivos mencionados previamente. Es por esto que se toma como salida del sistema la corriente del motor, la cual será utilizada como entrada a un observador de estados, quién brindará información de cada variable de estado, y al mismo tiempo implementará un control integral sobre w .

El elemento encargado de sensor dicha corriente será un sensor de efecto Hall, debido a su capacidad de medir corrientes tanto continuas como variables en tiempo. Si bien es un sensor que, a diferencia de una pinza amperimétrica, debe conectarse en serie a los motores, también cuenta con aislamiento galvánica, y su salida requiere menor procesamiento.

El sensor utilizado es ACS712ELCTR-05B-T, el cual tiene una sensibilidad de 0.185V/A y una corriente máxima de 5A, con picos de hasta 100A.

Con el fin de usar el rango completo de tensión de entrada de los ADC del microcontrolador, se optó por implementar la siguiente etapa de acondicionamiento de tensión de salida, la cual es elevada hasta un máximo de 3.3V (es decir, una sensibilidad efectiva del sensor de 0.61V/A).

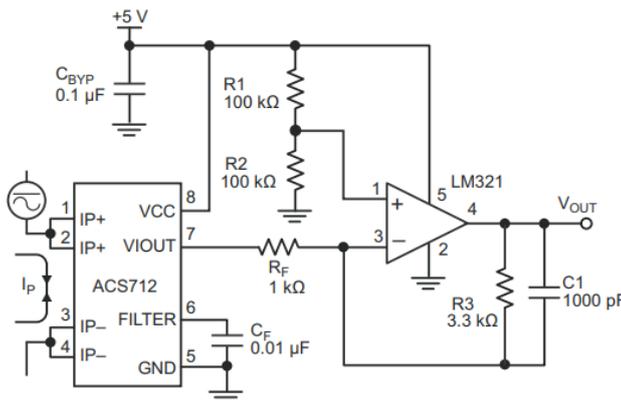


Figura 33 Etapa de acondicionamiento de señal de salida del sensor de corriente

14.2.2.3. Motor de corte

A diferencia de los motores mencionados previamente, la característica que define al motor de corte no es el torque que sea capaz de entregar, sino la velocidad de giro del mismo. Existe una gran variedad de motores que cumplan con dicha exigencia en el mercado, en especial los motores brushless que se utilizan normalmente para drones, por lo cual se buscará elegir uno dentro de ellos que se considere óptimo para esta aplicación.

Un modelo disponible en el país y de buena relación costo/beneficio es el motor brushless A2212. El mismo posee las siguientes características:

Kv	1000 rpm/V
Potencia máxima	150 W
Eficiencia	80%
Peso	53g
Corriente máxima	10A
Precio	US \$18

Tabla 1 Datos del motor de corte

Dado que el elemento de corte será una tanza y se cortará césped, se asume que la carga del motor va a ser despreciable, para facilitar los cálculos. Si bien esto no es cierto, se utilizarán diversos factores de seguridad a la hora de definir los puntos de trabajo del motor. De la hoja de datos se obtienen tres resultados de las pruebas realizadas sin carga:

V	Io	RPM
7 V	0,6 A	7380
8 V	0,65 A	8460
9 V	0,75 A	10500

Tabla 2 Información de tensión y velocidades

Luego de realizar una investigación sobre las velocidades de operación de las diferentes bordeadoras que existen en el mercado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Bordeadoras recomendadas para malezas, césped seco o duro, yuyos y arbustos trabajan con velocidades entre 6000 y 7500 RPM ya que la carga en estos casos es considerable. Son las que suelen utilizar jardineros o desmalezadores profesionales. Un ejemplo es la Bordeadora GL800 de Black and Decker.
2. Bordeadoras para césped y jardines mayormente de domicilios particulares utilizan velocidades superiores a 8000 RPM ya que requieren menor torque. Un ejemplo es la Bordeadora BDGL 700 de Black and Decker.

Siendo el caso número 2 el correspondiente al diseño llevado a cabo en este informe, se puede concluir que el motor no va a tener inconvenientes en cumplir con velocidades superiores a 8000 RPM. En cuanto al consumo, si se asume el caso de motor sin carga no implicaría ningún problema ya que entra dentro de los límites propuestos en la sección de baterías.

Para ajustar el caso a la realidad, se tomará un factor de seguridad de 100%. Por lo tanto, para lograr con 9V una velocidad de giro de 10500 RPM se necesitará el doble de potencia, implicando el doble de corriente. Esto resulta en una corriente del motor de 1,5 A, valor que es también aceptable dentro de los límites planteados en la sección de baterías.

En base al análisis realizado, se concluye que el motor brushless A2212 es adecuado para la implementación tanto del prototipo como del producto final.

14.2.3. Ruedas

14.2.3.1. Ruedas traseras

Para la elección de las ruedas, se tomaron como base modelos de Buggy a control remoto, ya que es un mercado considerablemente grande y tienen características similares a las que necesita la cortadora de césped autónoma, como el terreno para el cual están diseñadas y el tamaño. Dado que estas ruedas se utilizan en modelos de Buggy de menor peso y mismo terreno, se asume que no generarán inconvenientes en cuanto a la tracción que ofrecen.

De las ruedas para modelos Buggy RC que se pueden adquirir en el mercado local, se decidió elegir el modelo Impact 1:10 de la empresa AKA por los siguientes motivos:

1. Beneficios y similitudes con los modelos de Buggy como fue mencionado.
2. Diámetro de 11cm.
3. Dureza H7
4. Precio de 25 US\$ por el par de ruedas, admisible dentro del presupuesto establecido.

La clasificación de la dureza abarca desde H1 hasta H7 en todos los modelos para Buggy que se venden actualmente en el país. A mayor número, mayor dureza. Debido a la falta de información y detalles que debería brindar el fabricante, no es posible determinar analíticamente si el torque que ejercerá el motor será soportado por la estructura de la rueda.

Frente a esto, se decidió adquirir estas ruedas por ser las de mayor dureza. Las mismas serán evaluadas en el funcionamiento del prototipo y, de funcionar correctamente, serán incluidas definitivamente en el producto final.

14.2.3.2. Rueda delantera

La rueda delantera es una rueda giratoria simple, comúnmente denominada rueda “boba”. La misma debe girar libremente y servir como punto de apoyo delantero. Debido al alto grado de libertad en este aspecto, se eligieron las ruedas marca TR de espesor 22mm y diámetro 55mm, con bujes de acero y capacidad de soportar hasta 200kg. La conexión al chasis se realizará mediante bulones de diámetro menor o igual a 7mm.

14.2.4. Diseño mecánico

14.2.4.1. Chasis

Para el diseño del chasis, se consideró como punto de partida el diámetro estándar de las cuchillas y tanzas utilizadas en el mercado, de 30 cm. Ubicando el motor de corte en el centro, se obtiene que las dimensiones deben ser, como mínimo, 30 cm x 30 cm y 60 cm x 60 cm como máximo según el requerimiento REQ-01. Como los motores de las ruedas traseras y la rueda delantera irán también debajo del chasis, se debe dejar espacio para la ubicación de los mismos.

Idealmente, sin margen de error, sumando los diámetros y largos de los motores y de la rueda delantera se obtiene que el chasis puede tener un largo mínimo de 40 cm y un ancho mínimo de 39 cm.

Para garantizar un margen considerable de seguridad se definieron los siguientes valores:

1. Ancho = 45 cm
2. Largo = 52,5 cm

Para la implementación se decidió utilizar aluminio 6061, por su rigidez, costo, disponibilidad y bajo peso (comparado con cualquier tipo de acero). Para evitar roturas o inconvenientes con el chasis, y poder soportar todo el peso que se le coloque encima, se definió como primera instancia utilizar un grosor de 5 mm para la plancha de aluminio.

Con el fin de reducir el impacto del peso del chasis sobre otros subsistemas, como lo puede ser el torque de los motores de movimiento, se busca reducir este parámetro al mínimo posible.

Como primera instancia se definió utilizar un frente semicircular de radio de 22,5 cm, eliminando todo el material fuera de este semicírculo. En segundo lugar, se incluyeron 20 agujeros en el chasis para alivianar el peso del mismo, 12 agujeros de 3 cm de diámetro y 8 de 4 cm. Estos fueron ubicados en puntos de la plancha que no deberá soportar peso considerable, es decir, que no deberá hacer de viga para los motores ni soportar el peso de las batería.

Con estas consideraciones, el chasis se diseñó como se muestra en la siguiente imagen:

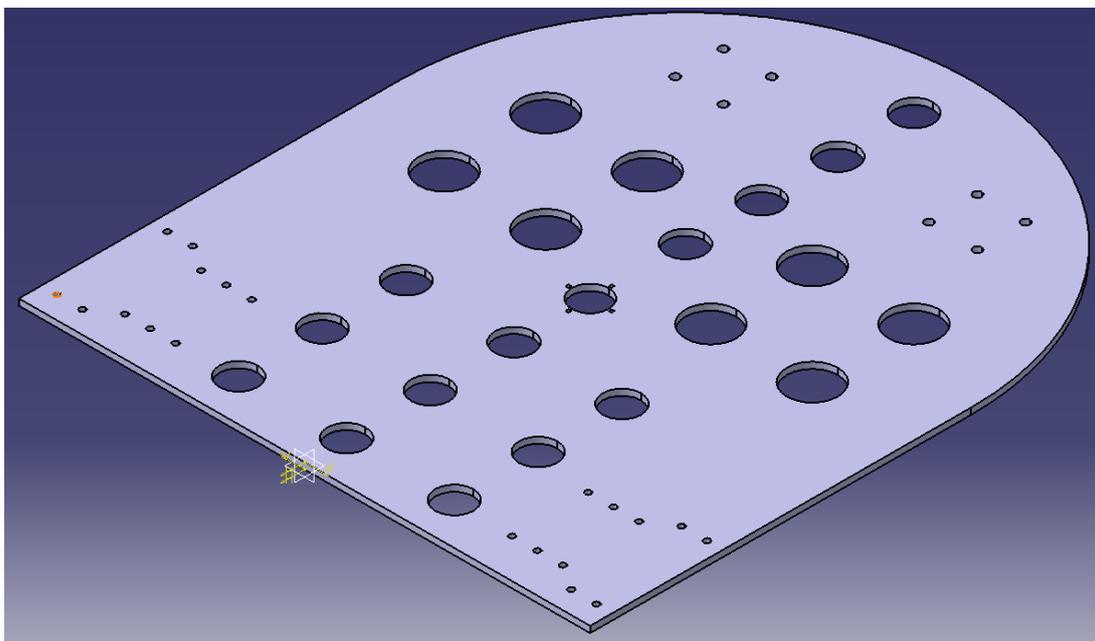


Figura 34 Chasis

Para estimar el peso se realizaron los siguientes cálculos con los valores previamente mencionados:

1. Área inicial (sin agujeros) = 2940 cm^2
2. Área total de agujeros = 204 cm^2

Derivando en un área efectiva de 2736 cm^2 . Con un espesor de la plancha de 5 mm y una densidad del aluminio 6061 de $2,7 \text{ g/cm}^3$, se obtiene:

1. Volumen efectivo = 1368 cm^3
2. Peso estimado del chasis = 3,7kg

14.2.4.2. Adaptador motor - rueda

El método de transmisión de potencia que utilizan los motores MR08D-024022 (para las ruedas traseras) es un agujero de 4mm de diámetro en su eje, por el cual se inserta cualquier tipo de elemento pasante que permite transmitir potencia a otro eje que se acople. Dado que el elemento que tiene que recibir dicha potencia es una rueda con conexión de hexágono de 17mm, se diseñó un adaptador

capaz de vincular ambos elementos. El mismo consiste en un cuerpo cilíndrico hueco (con un agujero de 4mm para recibir la potencia del eje del motor) y una cabeza hexagonal de 17mm de lado, para acoplarse a la rueda. Las especificaciones del adaptador son las siguientes:

1. Diámetro exterior: 12mm
2. Diámetro interior: 8.3mm
3. Largo del cuerpo cilíndrico: 34mm
4. Lado del hexágono de la cabeza: 17mm
5. Largo de la cabeza: 5mm
6. Material: aluminio
7. Peso del adaptador: 10g

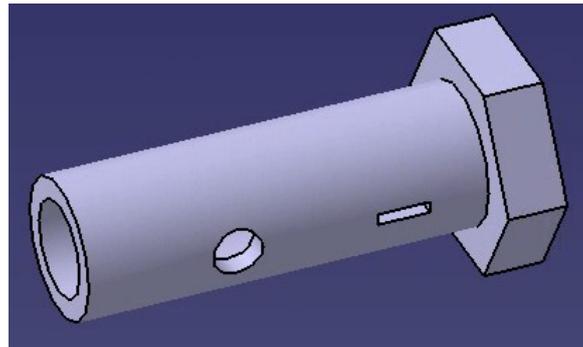


Figura 35 Adaptador motor-rueda

La elección de aluminio corresponde a un material accesible, liviano, fácilmente mecanizable y resistente. Para transmitir la potencia, se utilizará un perno de hierro dulce. Para evaluar la resistencia del material, se calcularon los esfuerzos en el punto de contacto entre el perno y el adaptador de aluminio. Hay dos tipos de roturas que pueden ocurrir: el corte del perno o el desgarro del adaptador, alrededor del agujero de 4mm. La fuerza a evaluar es la misma en ambos casos, ya que es la que ocurre en el perímetro del eje del motor.

Si bien el perno y el adaptador presentan una superficie de contacto, la mayor fuerza ocurre en el punto más cercano al eje. Como el diámetro del eje del motor es de 8mm, el punto de contacto ocurre a una distancia de 4mm (su radio), y, con un torque ya calculado de 2,7Nm, la fuerza en dicho punto es la siguiente:

$$F = 2,7Nm/4mm = 675N$$

El esfuerzo que se ejercerá sobre el perno se obtiene al evaluar la fuerza calculada sobre la sección de dicho elemento. Además, se toma un factor de seguridad S del 100%. Entonces:

$$\sigma_{perno} = \frac{675N}{2 * (\pi * 4mm^2)} * (1 + S) = 53,71MPa$$

El hierro dulce tiene un límite elástico al corte de 125,4 MPa, por lo que no presenta ningún problema de resistencia del material.

Por otro lado, el esfuerzo que ejercerá el perno sobre el adaptador será la misma fuerza sobre el área que va desde el agujero de 4mm hasta el extremo, como se muestra en la siguiente figura:

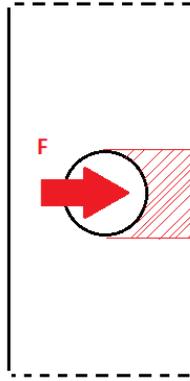


Figura 36 Esfuerzos sobre el adaptador

Entonces, el esfuerzo ejercido será:

$$\sigma_{\text{adaptador}} = \frac{675N}{2 * (16\text{mm}^2)} * S = 42,19\text{MPa}$$

El aluminio 6061 tiene un límite elástico al corte de 62,7 MPa, por lo que tampoco presenta ningún problema en cuanto a los esfuerzos presentes.

Se concluye entonces que los materiales tanto del perno como el del adaptador fueron correctamente seleccionados.

14.2.4.3. Adaptador motor - chasis

Un problema que surge al utilizar estos motores para las ruedas traseras es que no tiene ningún tipo de mecanismo sobre el cuerpo para poder fijarse a alguna superficie. Es completamente liso, lo que dificulta la adhesión del motor al chasis y provoca que el motor rote sobre el chasis en lugar de rotar su eje. Sin embargo, el motor presenta en el frente cuatro agujeros roscados (rosca M4) como se muestra a continuación:

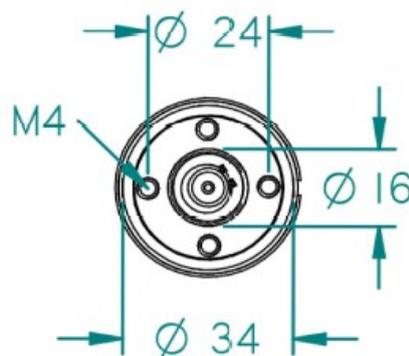


Figura 37 Vista frontal de los motores a utilizar

Dado que el chasis será plano, se requiere de un adaptador para fijar el motor a este, y cambiar de plano la fuerza resultante que se ejercerá como consecuencia del torque entregado. Además, el adaptador a diseñar deberá permitir espacio para el adaptador eje - rueda y el perno que se usará para transmitir la potencia del eje. Se realizó el siguiente diseño:

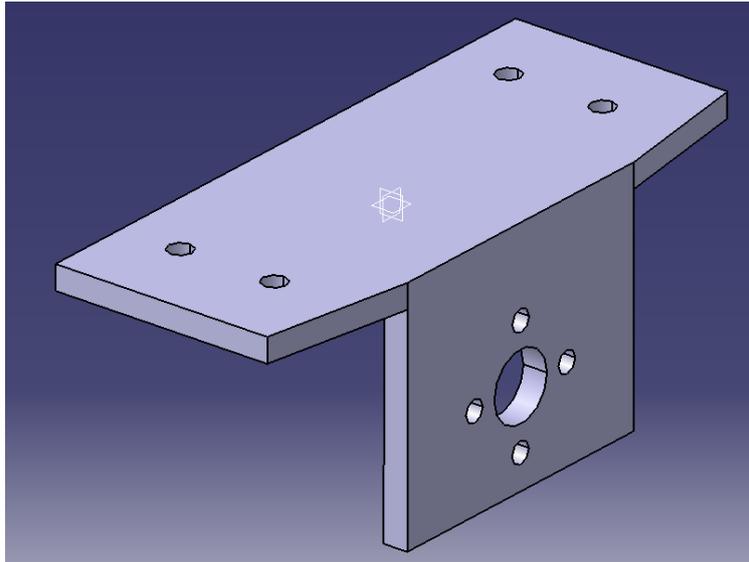


Figura 38 Adaptador motor - chasis

El motor estará en contacto con el chasis y el adaptador por encima de este último. Todas las conexiones se realizarán mediante bulones. El motor quedará fijo al adaptador mediante los cuatro bulones en el frente, y el adaptador se fijará al chasis con otros cuatro bulones iguales. De esta forma, se puede asegurar que el motor quedará fijo con respecto al chasis y solamente rotará su eje. El torque se transformará en fuerza lineal, la cual mantendrá su sentido y dirección, pero cambiará de plano debido al ángulo de 90 grados del adaptador.

Se definió que el material del adaptador sea aluminio y que su grosor sea de 5mm, como primeras aproximaciones para calcular la resistencia de este.

Como ya se calculó antes, el torque a ejercer por cada motor será de 2,64Nm. Dado que la conversión a fuerza para este análisis se realizará sobre los cuatro agujeros roscados en el frente, el radio de los mismos con respecto al eje determinará la fuerza máxima. Entonces:

$$F_{adaptador} = 2,7Nm/12mm = 225N$$

Analizando el diseño, hay tres puntos donde pueden existir esfuerzos que generen inconvenientes:

1. Contacto bulones del motor al adaptador

Por un lado, se debe considerar el corte de los bulones. Aproximando su diámetro a 5mm, y considerando que cada uno soportará un cuarto de la fuerza que entrega el motor, el esfuerzo que soportará cada uno es

$$\sigma_{bulones} = \frac{225N}{4 * \pi * (2,5mm)^2} * (1 + S) = 5,73MPa$$

Asumiendo bulones de hierro dulce, con límite elástico de 124,5Mpa, se observa que estos esfuerzos no presentarán ningún problema.

En segundo lugar, se considerará la opción del desgarro de la pieza, según se muestra en la siguiente imagen:

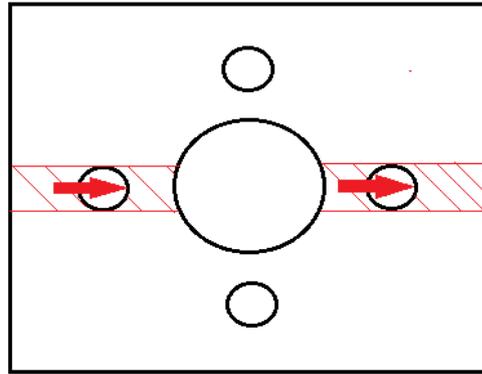


Figura 39 Esfuerzos de desgarro en el adaptador motor - chasis

Por la presencia del círculo central, no se considerará la fuerza ejercida en los agujeros inferior y superior. Considerando la sección marcada en la imagen:

$$\sigma_{desgarro} = \frac{225N}{2 * 166,5mm^2} * (1 + S) = 1,35MPa$$

Siendo el adaptador de aluminio, con un límite elástico de 62,7MPa, nuevamente no habrá inconvenientes con los esfuerzos.

2. Codo del adaptador

El mayor esfuerzo estará en la sección del codo, con el ángulo de 90 grados. Tomando la sección de 5 mm de espesor y 60 mm de largo, se tiene:

$$\sigma_{codo} = \frac{225N}{300mm^2} * (1 + S) = 1,5MPa$$

El esfuerzo estará lejos de lo máximo tolerado por el aluminio (como se observa en el punto anterior).

3. Contacto bulones del chasis al adaptador

El análisis es el mismo que para el contacto entre los bulones del motor y el adaptador. El área de desgarro será mayor ya que no presenta un agujero central, por lo que se determina que no es necesario un análisis numérico y se asume que no se generarán inconvenientes en este punto.

Se determina que al realizar el adaptador con las medidas y el material mencionados se soportarán todos los esfuerzos que genere la fuerza de cada motor.

14.2.4.4. Altura regulable

El motor A2212/6T que se usará para cortar el césped se fijará al chasis del equipo mediante cuatro bulones de rosca M3 (3mm de diámetro). El motor presenta una altura de 55mm, compuesta por 27mm correspondientes a su cuerpo (desde el plano de contacto con el chasis) y 28mm de largo del eje. Por su parte, la distancia entre el plano superior del chasis y el suelo consiste en la suma del radio de las ruedas traseras, el radio del motor acoplado a las mismas y los 5mm de espesor de la plancha

de aluminio. Con estos datos, se obtiene que la distancia entre el plano superior del chasis y el suelo es de 78,5mm, definiendo los límites para la altura del corte:

1. Mínima: $78,5\text{mm} - 55\text{mm} = 23,5\text{mm}$
2. Máxima: 77mm (se toman 1,5mm de margen con respecto al chasis)

Para obtener cualquier altura que no sea la mínima se debe regular la altura de la base del motor de corte con respecto al plano superior del chasis. El objetivo de esta sección es cumplir con el requerimiento REQ-03 de forma tal de permitir diferentes alturas de corte con un diseño sencillo y de fácil uso para el usuario final.

Como solución, se decidió discretizar los distintos niveles de altura de corte en los siguientes valores:

1. 23,5mm
2. 35mm
3. 45mm
4. 55mm
5. 65mm
6. 75mm

Para alcanzar estas alturas se diseñó la siguiente plataforma:

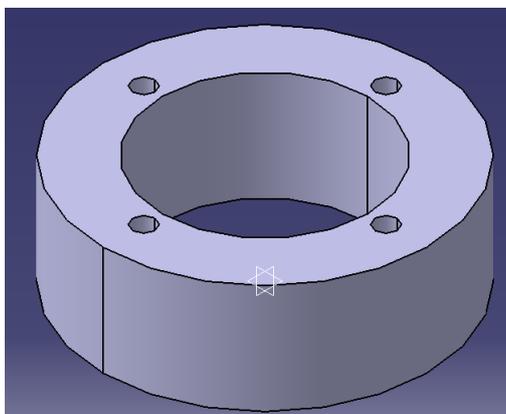


Figura 40 Plataforma para la regulación de altura de corte

En el agujero central se encontrará el cuerpo del motor con el eje hacia abajo, mientras que los cuatro agujeros de alrededor estarán roscados también con M3 de forma tal de poder acoplarse al motor de corte. La altura de esta plataforma será la diferencia entre la altura mínima de corte y la altura de corte deseada.

Dado que los esfuerzos que sufrirá esta plataforma serán mínimos (muy bajo torque), es conveniente realizarla mediante impresión 3D con PLA. Además de la facilidad de fabricación, este método reduce notablemente los costos en comparación con su equivalente metálico, si se quisiese mecanizar una pieza en aluminio.

Para regular la altura de corte, se generará un conjunto de cinco bases de distintas alturas, que se entregarán al usuario final junto con el producto, que le permitirá cambiar la altura de corte del equipo.

Los motivos de la implementación de este método de regulación de la altura son los siguientes:

1. Al poder imprimir las bases, no representa costos adicionales significativos y simplifica el proceso de elaboración de las mismas.
2. Se simplifica el diseño y la implementación del producto.
3. Se elimina la presencia de eventuales partes mecánicas móviles para ajustar la altura, reduciendo complejidad y costos.
4. Facilidad de cambio para el usuario: deberá retirar los tornillos, cambiar la base por otra y ajustar nuevamente los mismos tornillos.

Con estas justificaciones, se realizarán bases de 11,5mm, 21,5mm, 31,5mm, 41,5mm y 51,5mm que se entregarán al usuario junto al producto.

Para justificar la elección del material, se evaluaron los puntos de mayores esfuerzos en la pieza. En primer lugar, se estimó la fuerza que ejercerá el motor sobre las uniones mediante la información presente en la hoja de datos.

Considerando que el motor girará a 10500 rpm (175 revoluciones por segundo) prácticamente sin carga (aproximación inicial), consumirá una potencia eléctrica de 7,5W. Para evitar errores por la aproximación realizada, se toma un factor de seguridad del 100%, redefiniendo la potencia a 15W. Dado que el motor en esa velocidad tiene una eficiencia del 50%, la potencia mecánica que entregará será de 7,5W. Girando a la velocidad mencionada, se tiene que:

$$\omega = 2\pi * 175s^{-1} \approx 1100 \text{ rad/s}$$

$$\tau_{\text{corte}} = 7,5W/1100\text{rad/s} = 0,68\text{Ncm}$$

Dado que los centros de los agujeros donde estarán los tornillos están a 1,6cm del eje de rotación, la fuerza sobre los mismos será:

$$F_{\text{corte}} = \tau_{\text{corte}}/1,6\text{cm} = 0,43\text{N}$$

El primer esfuerzo a evaluar es el corte sobre los tornillos. Con la fuerza calculada y tornillos de 3mm de diámetro, se tiene que cada uno soportará el siguiente esfuerzo:

$$\sigma_{\text{tornillo}} = \frac{0,43\text{N}}{4 * \pi * (1,5\text{mm})^2} = 0,015\text{MPa}$$

Por otro lado, se analiza la posibilidad de desgarro de la pieza en los puntos de contacto entre los tornillos y el plástico, como se muestra en la siguiente figura:

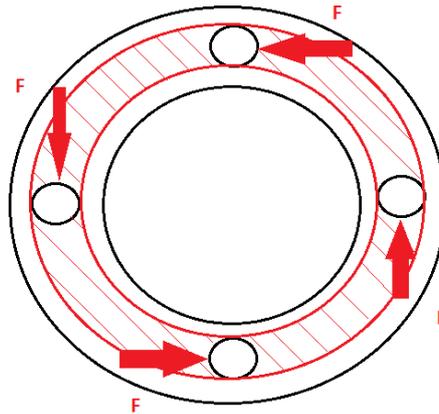


Figura 41 Esfuerzos de desgarro

El área remarcada corresponde a toda la superficie que sufrirá el esfuerzo y tiene un eventual riesgo de desgarro. Dado que el área es aproximadamente 21mm^2 , el esfuerzo será el siguiente:

$$\sigma_{\text{pieza}} = \frac{0,68\text{N}}{21\text{mm}^2} = 0,03\text{MPa}$$

Como el PLA tiene un límite elástico al corte de $28,5\text{MPa}$, se concluye que la elección del material es correcta.

14.2.4.5. Carcasa

Se diseñó una carcasa dividida en tres secciones para cumplir con las especificaciones del proyecto, la cual se puede observar en la siguiente figura:

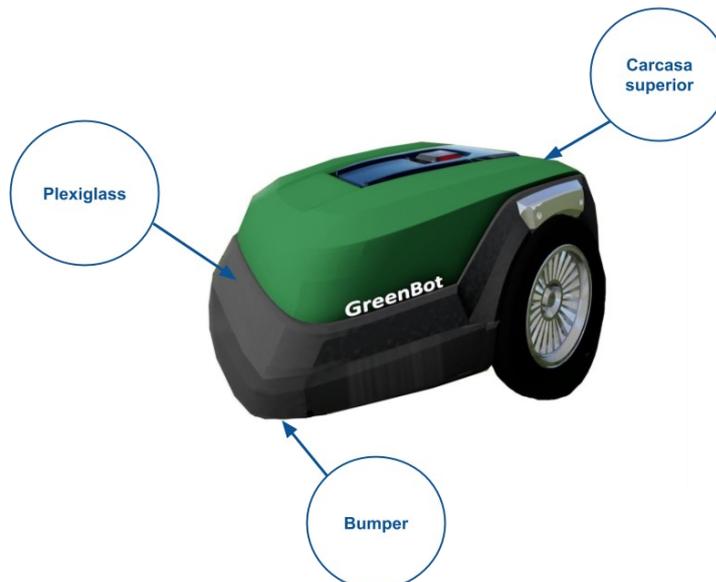


Figura 42 Carcasa diseñada para el producto final

- Carcasa superior: cumple el objetivo de proteger todos los componentes electrónicos de la cortadora de césped. La implementación debe realizarse en plástico (PLA) de color verde.
- Plexiglass: Sirve como filtro para los sensores infrarrojos de detección de objetos, y debe estar incorporado en un soporte de plástico de color gris.
- Bumper: También implementado en plástico, sirve para proteger el arreglo de sensores fin de carrera y reducir el efecto de cualquier impacto inesperado sobre la cortadora.

14.2.5. Etapa de Potencia

Los componentes principales de la etapa de potencia son los siguientes

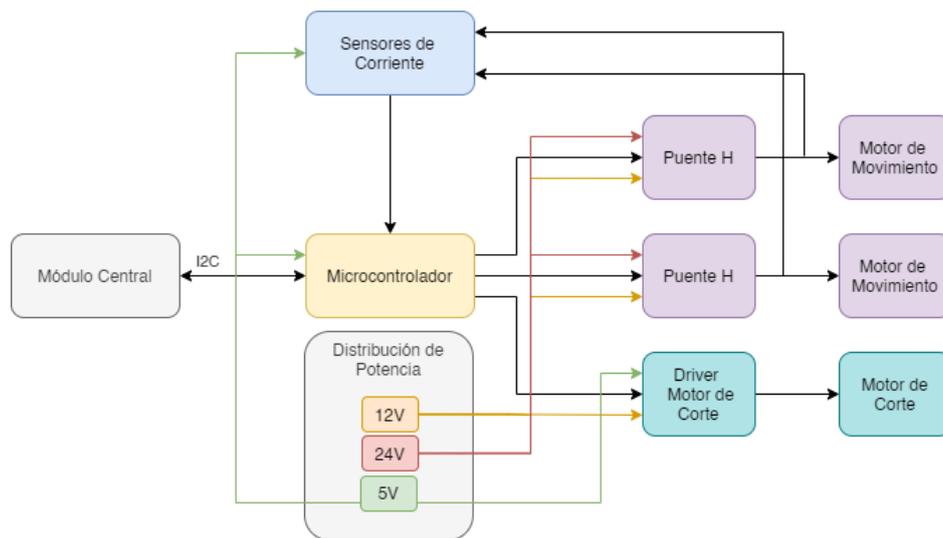


Figura 43 Diagrama en bloques de la etapa de potencia

El microcontrolador es el encargado de comunicarse con el Módulo Central a través de un bus I2C. Este enviará información acerca de cuándo encender cada motor y a qué velocidad se lo desea hacer girar. Por su parte, el microcontrolador de Potencia devolverá información al módulo central, entre la que se destaca:

- Velocidad actual de los motores
- Falla en el sistema de distribución de potencia
- Falla de atascamiento en los motores

Para detectar un atascamiento en los motores de movimiento, se usarán los mismos sensores de corriente utilizados en el control de estos, generando una señal de alerta hacia el módulo central cuando el valor medio de corriente consumida sea elevado durante varias mediciones (que no sea un consumo transitorio).

14.2.5.1. Consumo eléctrico

Para la elección de las baterías a utilizar, es necesario estimar el consumo eléctrico total del equipo. En una primera instancia, es razonable asumir que el consumo total no se desviará demasiado del consumo que tendrán los tres motores. Por esto, se decidió agrupar toda la electrónica presente en

la cortadora de césped como un único bloque para el análisis del consumo. Entonces, se tienen cuatro elementos que consumirán una potencia considerable:

1. Motor de rueda trasera derecha
2. Motor de rueda trasera izquierda
3. Motor de corte
4. Electrónica

Los primeros tres cuentan con información en sus respectivas hojas de datos para determinar consumo mínimo, medio y máximo.

- Para los motores de las ruedas:
 - $I_0 = 0,21 A$; corriente del motor sin carga
 - $I_n = 1,27 A$; corriente nominal del motor
 - $I_s = 7 A$; corriente de arranque / carga máxima
- Para el motor de corte:
 - $I_0 = 0,5 A$; corriente del motor sin carga
 - $I_n = 1 A$; corriente nominal del motor
 - $I_s = 13 A$; corriente de arranque / carga máxima

Dado que los motores de las ruedas se moverán siempre en sintonía (variando únicamente el sentido de giro cuando el equipo debe rotar), se considerarán ambos juntos para el análisis, obteniendo los siguientes valores:

- Motores de ruedas combinados:
 - $I_0 = 0,42 A$; corriente del bloque sin carga
 - $I_n = 2,54 A$; corriente nominal del bloque
 - $I_s = 14 A$; corriente de arranque / carga máxima

A través de las hojas de datos de los principales componentes electrónicos (GPS, microcontroladores, fuentes) se estimó el consumo del bloque entero, diferenciando mejor y peor caso.

- Electrónica:
 - Peor caso: 1 A
 - Mejor caso: 0,5 A

Con las estimaciones de corriente, el paso siguiente corresponde a analizar el tiempo que le llevará al equipo realizar la totalidad del corte planeado. En este punto surge una relación de compromiso entre el tiempo de trabajo y el consumo. A mayor tiempo de trabajo, la velocidad de los motores de ruedas será menor y consumirán menos corriente, pero estarán más tiempo consumiendo dicha corriente. Cuanto más rápido sea el corte, más consumirán los motores, pero por menor tiempo.

Para resolver este problema se realizó una simulación, para la cual se asumió un área cuadrada de $100m^2$ y se incluyeron las siguientes variables:

- Tiempo en que el equipo va a estar avanzando
- Tiempo en que el equipo va a estar rotando (rotaciones de 90°)

- Número de rotaciones de 90° que se realizarán
- Arranques y tiempo de arranque
- Consumo de cada bloque asumiendo el peor caso
- Superposición de corte
- Velocidad de corte

En primer lugar, se asumió una superposición de corte nula, siendo este el caso ideal, y se tomaron dos velocidades para definir los tiempos de operación:

- ❖ Velocidad nominal: 25cm/s
- ❖ Velocidad máxima: 30cm/s

Con estos valores y el área asumida se calcularon todos los tiempos de operación. Sin embargo, para el caso de velocidad máxima el consumo será mayor, por lo que la forma de comparar ambos caminos es a través del consumo en el tiempo (Ah). Los resultados fueron los siguientes:

Consumo total estimado	Consumo		Caso
	2.22	Ah	-tiempo +corriente
2.08	Ah	+tiempo -corriente	
Tiempo de corte	Tiempo		Caso
	26.67	min	-tiempo +corriente
35.56	min	+tiempo -corriente	

Tabla 50 Consumos de corriente para los distintos tipos de corte

Se puede observar que el consumo en Ah es similar en ambos casos. Por lo tanto, esta primera aproximación sirve para definir que se utilizará la máxima velocidad posible, ya que se minimiza el tiempo de corte manteniendo prácticamente estable el consumo.

Para representar de mejor forma la realidad, luego de fijar la velocidad en 30cm/s se empezó a variar la superposición de corte. Al hacer esto, se pudo visualizar una relación exponencial entre el consumo y la superposición como se muestra a continuación:

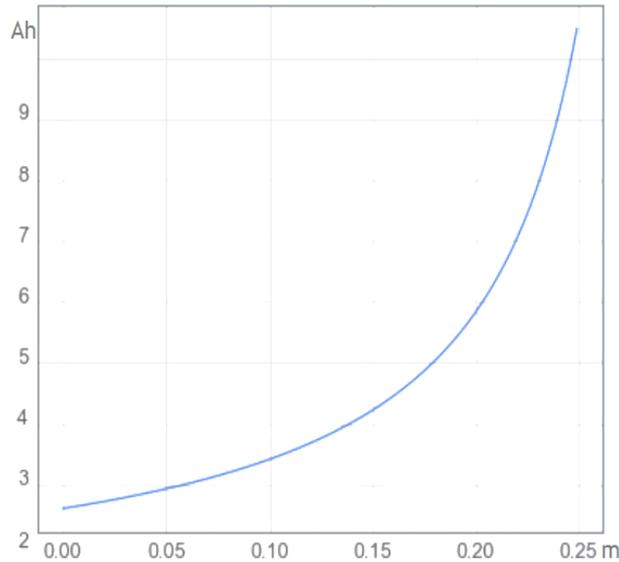


Figura 44 Consumo de los motores vs superposición en el corte

Si no se tiene superposición se obtiene el mínimo consumo de 2.22 Ah calculado para el caso ideal y, en caso de tener una superposición del 100%, el equipo estaría cortando siempre en el mismo lugar, no terminaría nunca y el consumo sería infinito.

Una superposición más baja implica una precisión mayor en el módulo de medición de la posición, por lo que se prefiere que la misma sea lo más alta posible para tener mayor versatilidad en esa medición.

Con todas estas consideraciones, se decidió utilizar una superposición de 10 cm, lo que derivó en el consumo final estimado:

Consumo total estimado	Consumo		Caso
	3.33	Ah	-tiempo +corriente
3.12	Ah	+tiempo - corriente	
Tiempo de corte	Tiempo		Caso
	40.00	min	-tiempo +corriente
53.33	min	+tiempo - corriente	

Tabla 51 Consumos estimados para una superposición del 10%

14.2.5.2. Baterías

Dado que el cálculo del consumo se realizó sobre un terreno cuadrado de $100m^2$ ideal, se decidió tomar un factor de seguridad del 100% sobre el consumo necesario, de forma tal de cubrir también la diferencia entre la capacidad real y la nominal de las baterías del mercado. De esta forma, se obtiene

que una batería con capacidad nominal de 6,66 Ah será suficiente para cumplir con el requerimiento de autonomía REQ-04.

Otra consideración surge del requerimiento REQ-19, el cual implica que la batería debe ser recargable. Además, se debe minimizar el precio de la misma de forma tal que se encuentre dentro del presupuesto establecido y sea fácil obtener en el mercado local, en caso de necesitar repuestos. Por último, ya que la tensión máxima que habrá en el equipo son 24 V, se necesitará una batería que otorgue dicha tensión e iguale o supere la capacidad de 6,66Ah.

Considerando todas estas cuestiones, se decidió que la mejor opción es utilizar dos baterías en serie de plomo-ácido Kaise KB127S AGM, de 7 Ah y 12 V, obteniendo la capacidad y la tensión necesarias al menor precio existente en el mercado. Las especificaciones de las baterías se muestran en la siguiente tabla, extraídas de la hoja de datos correspondiente:

Modelo	Kaise KB127S AGM
Tensión	12 V
Capacidad	7 Ah
Peso	1.9 Kg
Largo	151 mm
Ancho	65 mm
Alto	100 mm

14.2.5.3. Detección de estado de baterías

Con el objetivo de brindarle al usuario información acerca del nivel de carga de las baterías según el requerimiento REQ-15, se optó por implementar un circuito medidor de tensión y a partir de ella estimar la capacidad actual de cada una.

El circuito integrado a utilizar será el BQ34Z110 de Texas Instruments, el cual mide tensiones de hasta 64V en baterías de plomo-ácido, para luego mediante una interfaz I2C transmitir el valor de las estimaciones de carga y tiempo restante de funcionamiento al módulo central.

La conexión básica del circuito se puede observar en la siguiente figura

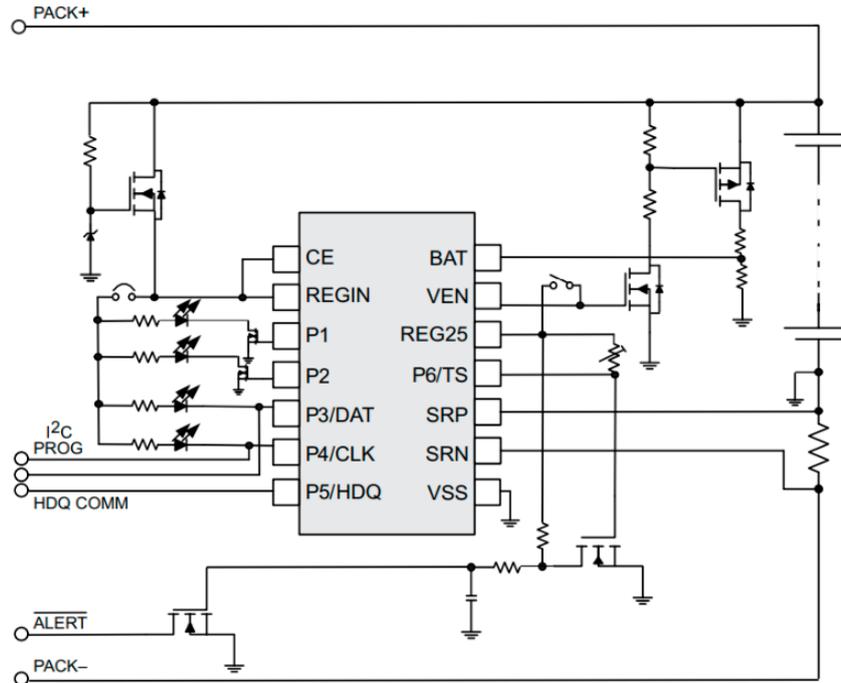


Figura 45 Conexión del detector de estado de baterías

Se puede observar que las baterías se conectan en serie a una resistencia de sensado, sobre la cual el circuito integrado hace mediciones de tensión de manera constante. Teniendo en cuenta que el ADC interno tiene un rango de 0.25V, y que la corriente máxima a circular es de 6A, dicha resistencia deberá ser de 0.05 Ohms y 2W.

14.2.5.4. Etapa de distribución de potencia

Debido a que solo se usan dos baterías de 12V conectadas en serie, es necesario adaptar la tensión proveniente de las mismas a valores que sean convenientes para el resto de los subsistemas.

Las tensiones de trabajo internas serán definidas por dos rieles de potencia, uno de 12V y otro de 5V. Teniendo en cuenta que ambas tensiones están alejadas a los 24V de entrada, resulta imposible el uso de reguladores de tensión, ya que ellos disiparían entre 12W y 19W por cada ampere consumido. Es por esto que se opta por utilizar convertidores DC-DC integrados, que, si bien ocupan más espacio y son más costosos que los reguladores de tensión, tienen un rendimiento cercano al 90%, a diferencia del 20% - 50% obtenidos utilizando dichos reguladores.

Cabe destacar que en la entrada de cada subsistema se utilizarán los reguladores que sean necesarios, con el fin de desacoplar cada placa del riel de alimentación, reduciendo el ruido de línea introducido.

Teniendo esto en cuenta, la topología de la etapa de distribución de potencia queda definida a continuación

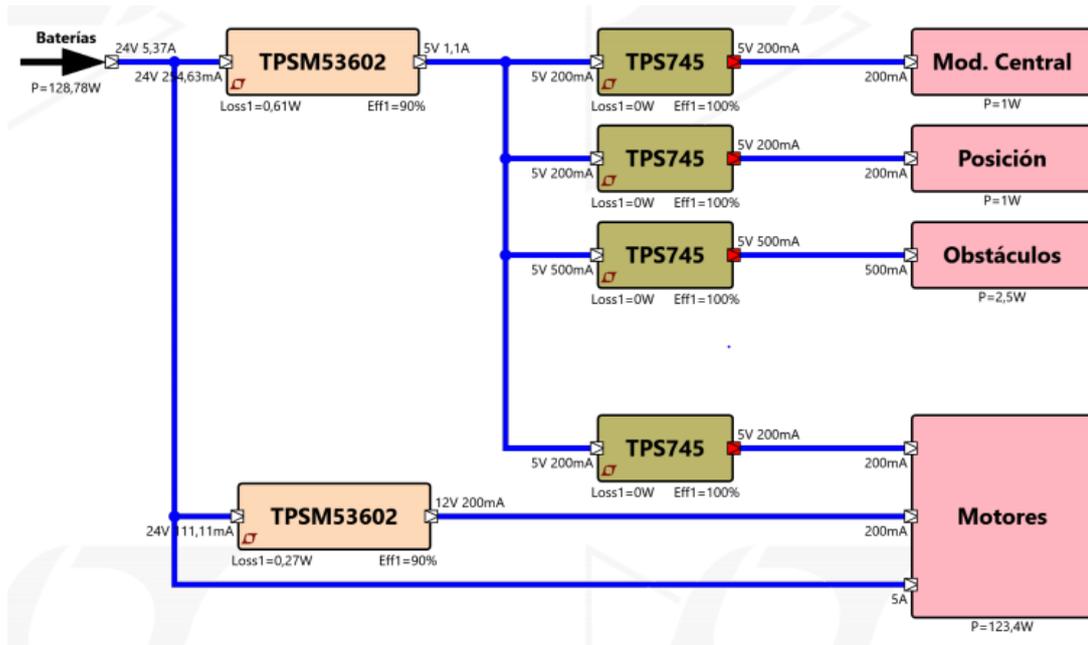


Figura 46 Topología de etapa de distribución de potencia

Donde los convertidores DC-DC son TPSM53602 de TI, y los reguladores TPS745 del mismo fabricante. Considerando un peor caso de 90% de eficiencia en los convertidores, se obtiene un consumo total en las baterías de 5.37A medios, y una disipación en la etapa distribuidora de potencia de 0.88W.

A modo de resumen, se listarán los consumos de cada bloque de la cortadora

Sistema	Tensión	Corriente
Módulo central	5V	200 mA
Posición	5V	200 mA
Obstáculos	5V	500 mA
Potencia	5V	200 mA
	12V	200 mA
	24V	5 A

Tabla 52 Peor caso de consumos medios sobre los cuales se diseñó la etapa distribuidora de potencia

14.2.5.5. Etapa de potencia: motores

14.2.5.5.1. Motores de movimiento

Para poder controlar los motores mediante pines del microcontrolador es necesario realizar una etapa intermedia de potencia, la cual mediante entradas de 3.3V o 5V genera las correspondientes salidas a 24V o menos, dependiendo de la velocidad de giro deseada.

Debido a que los motores giran en ambos sentidos, es decir se necesitan tensiones de ambas polaridades, se optó por utilizar una topología *full bridge* o puente h. Para dicha implementación se optó por usar el driver DRV8432 de Texas Instruments, el cual es capaz de manejar dos puentes al mismo tiempo, con una corriente máxima continua de 7A para cada uno.

El circuito a utilizar es el siguiente:

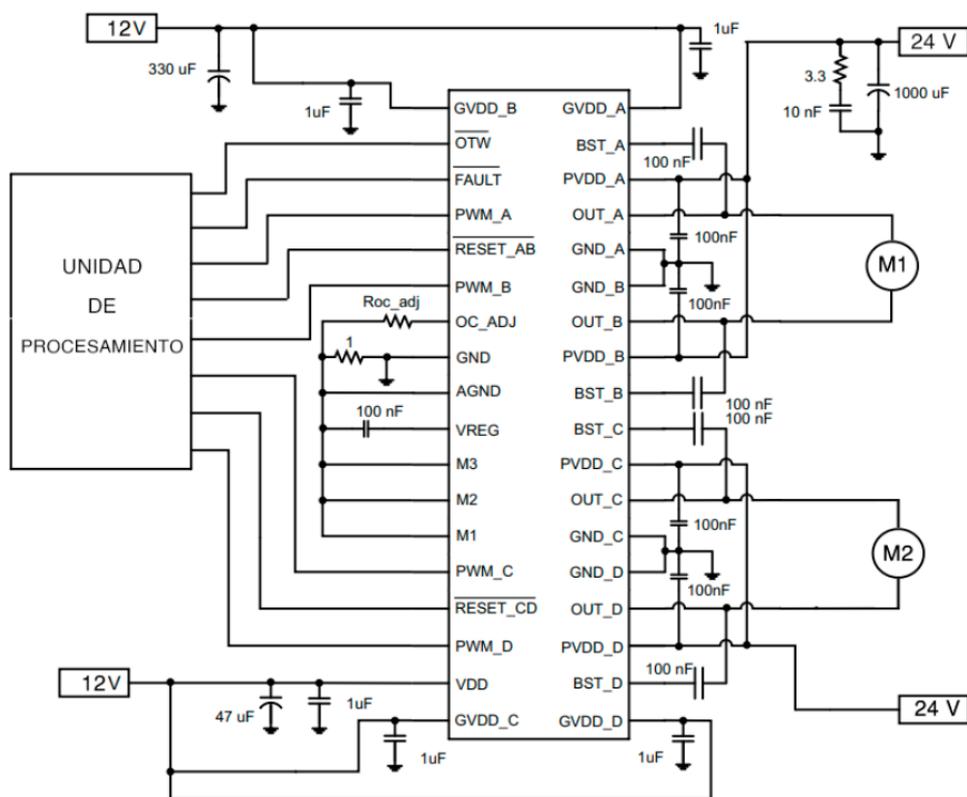


Figura 47 Conexión del driver a utilizar

Si bien cada submódulo cuenta con un regulador propio, es necesario agregar capacitores para reducir el ruido en las líneas de 24V y 12V, en este caso los capacitores utilizados son de tecnología electrolítica, 1000uF de capacidad y 100V de tensión máxima para la etapa de potencia (24V) y 330uF 100V para la línea de 12V.

Por último, se agregan capacitores en cada salida para mantener la tensión constante (si bien la misma puede variar su valor medio, es necesario mantenerlo constante dentro de las conmutaciones del puente), los cuales se pueden observar en la siguiente imagen.

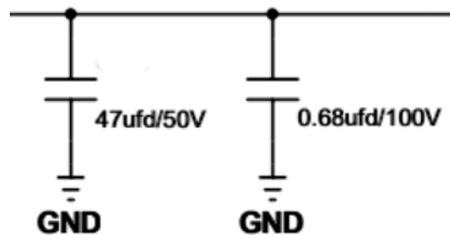


Figura 48 Capacitores de salida

14.2.5.5.2. Motor de corte

Para el motor de corte, a diferencia de los motores de movimiento, no se busca implementar ningún tipo de control, si no que trabajará en modalidad “on-off”, siempre con un *duty cycle* fijo. Teniendo esto en cuenta, se optó por utilizar etapas de potencia comerciales.

Dentro de los productos disponibles, se utilizó el 30A BLDC ESC, que está formado por un *inverter* junto a su etapa de control, incluyendo las llaves de conmutación MOSFET. Este controlador posee 2 pines de alimentación de potencia (conectados al riel de 12V), 3 pines de salida (conectados al motor de corte), y 2 pines de control (conectados al microcontrolador). A través de estos últimos es por donde la unidad de control, mediante el uso de una señal PWM, elegirá cuando y a qué velocidad hacer funcionar el motor.

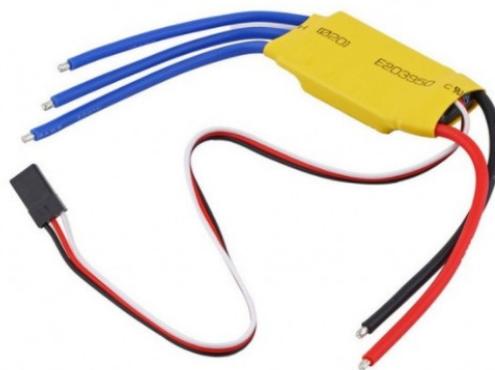


Figura 49 Controlador del motor de corte a utilizar

14.2.6. Detección de objetos

El módulo de detección de objetos cuenta con diversos submódulos que trabajan en conjunto detectando posibles objetos por colisión o a cierta distancia desde la parte frontal de la cortadora. En caso de detectar un posible objeto esta información debe reportarse al módulo central.

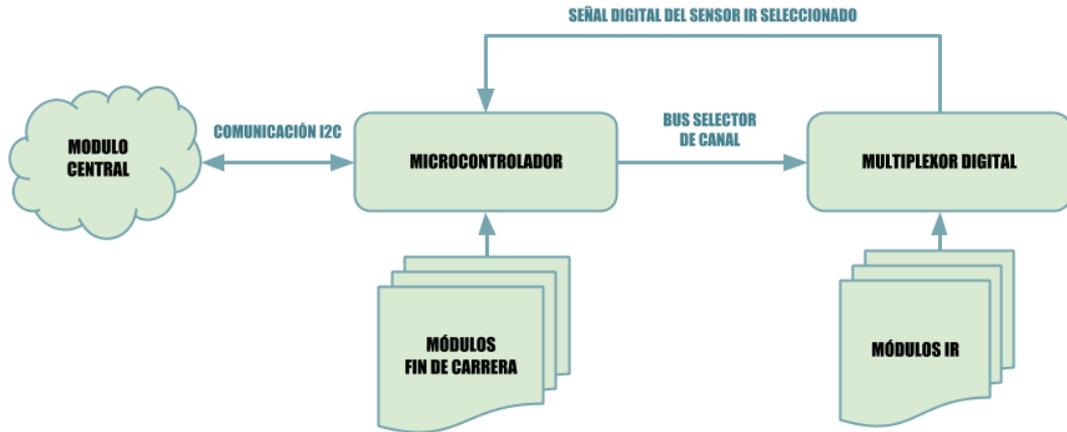


Figura 50 Diagrama en bloques del módulo de detección de objetos

14.2.6.1. Módulo Infrarrojo

Para poder esquivar un obstáculo es necesario tener información de la dirección y sentido de este con respecto a la cortadora de césped. Como se mencionó en la sección de factibilidad tecnológica, se utilizarán transmisores y receptores infrarrojos. Para poder brindar esta información a los algoritmos de detección de obstáculos, es necesario abarcar todo el frente de la cortadora, para lo cual se realiza el siguiente estudio.

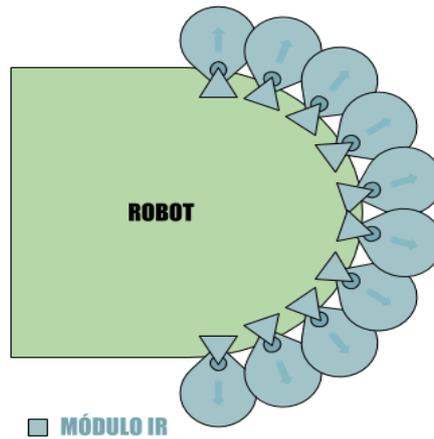


Figura 51 Disposición de los módulos IR

Los módulos tienen que estar equidistantes entre sí con el fin de abarcar uniformemente la parte frontal de la cortadora (cubriendo 180°). Además, se debe tener una cantidad par de sensores debido a los requerimientos de los algoritmos usados en este subsistema. Para el cálculo de la distancia entre sensores se tienen en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- Radio frontal del chasis.
- Cantidad de sensores a utilizar.

Utilizando el cálculo de la longitud de arco se obtienen los valores necesarios para la disposición correcta de los sensores. La distancia entre ellos se calcula de la siguiente manera:

Número de Sensores = 16

$$\theta = \frac{180^\circ}{\text{Numero de Sensores}} = 11.25^\circ$$

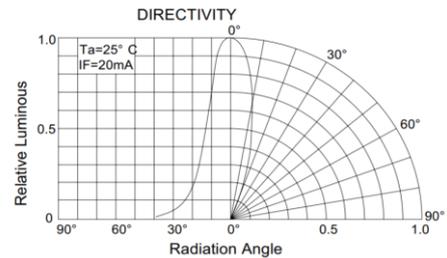
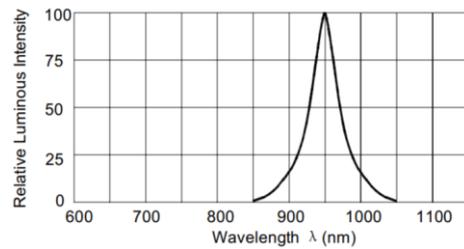
$$dl = rd\theta$$

$$l = 20cm \times \frac{2\pi}{360^\circ} \times 22.5^\circ = 3.93 \text{ cm}$$

Figura 52 Cálculo y distribución de los módulos IR

Los transmisores y receptores a utilizar serán elegidos según los siguientes parámetros

- Longitud de onda (λ): esto es importante ya que los transmisores tienen asociado una intensidad de luminosidad que se concentra alrededor de una longitud de onda en particular. El receptor debe estar construido para la recepción de dicha λ ya que funciona como un filtro pasa banda.
- La directividad: cada transmisor tiene asociado un ángulo de apertura por donde se transmitirá la mayor parte de su potencia.



Es importante que la parte frontal de la cortadora, donde están ubicados los módulos IR, se cubran con algún material para evitar que se dañe la electrónica y que estos operen sin ninguna obstrucción. Es por este motivo que se debe usar un acrílico especial llamado *Plexiglass* de color negro, el cual actúa como un pasa banda para las longitudes de ondas del infrarrojo, y al mismo tiempo evita que se dañe la electrónica y que esta no se vea por cuestiones de estética. Las longitudes de onda utilizadas en los transmisores se encuentran en el orden de los 750nm , por lo que es necesario reducir la exposición a todas las ondas del espectro visible que se encuentran entre los 400nm a 700nm y la luz ultravioleta (UV).

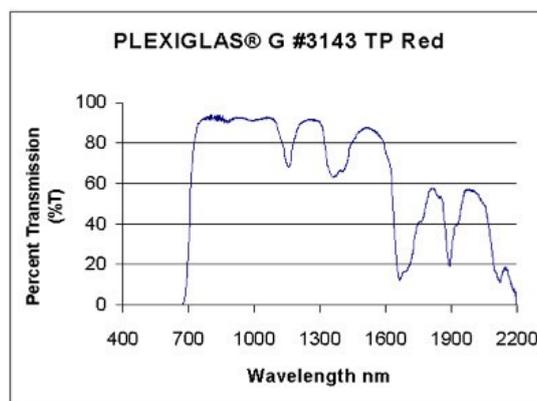


Figura 53 Curva característica por el material cobertor de los módulos IR

Cada módulo IR contará con un fototransistor como receptor y un diodo infrarrojo que emitirá el pulso correspondiente. La disposición de los componentes se puede visualizar en la siguiente figura. Además, se contará con un módulo en la parte inferior de la cortadora así se podrá detectar si esta fue levantada del suelo.

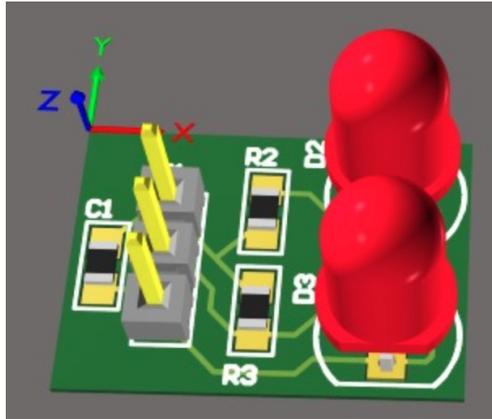


Figura 54 Disposición de los diodos transmisores y receptores

La señal obtenida de este módulo será analógica y dependerá de la distancia a la que se encuentre el objeto. El esquemático de los módulos es el siguiente:

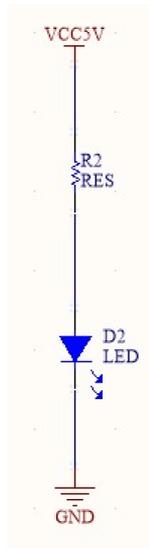


Figura 55 Esquemático transmisor

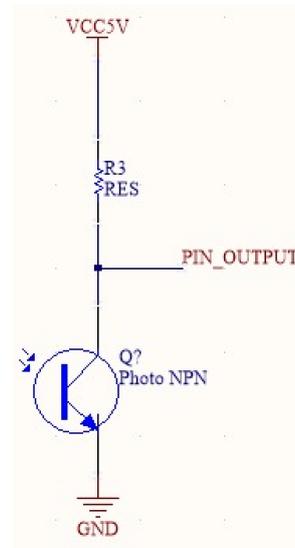


Figura 56 Esquemático receptor

Se decidió pasar la señal analógica por una segunda etapa de comparadores de tensión donde se fijará la distancia mínima de detección del objeto, y al mismo tiempo obtener niveles de tensión aptos para los pines GPIO del microcontrolador. En el caso de que la señal supere el umbral definido el comparador pondrá una tensión que será utilizada por otros módulos del circuito.

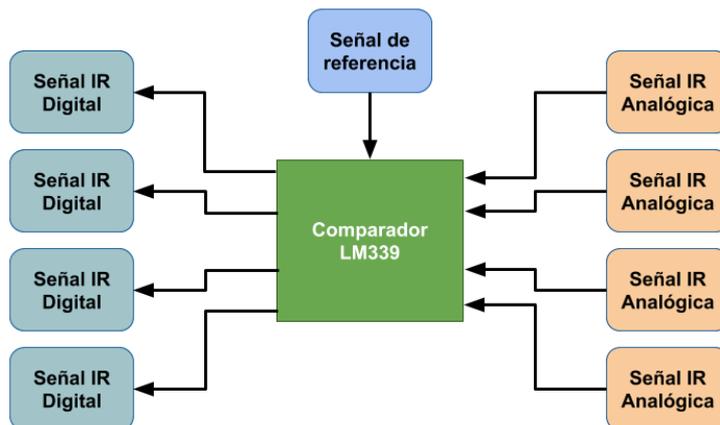


Figura 57 Módulo comparador de señales IR

Se utilizará un integrado LM339, que tiene 4 comparadores para procesar la señal analógica de la salida de 4 módulos IR (el esquemático se encuentra en el anexo). Además, para cada uno de estos integrados se utiliza una señal de referencia con el fin de establecer la distancia umbral para los sensores.

Estos comparadores fueron seleccionados por su bajo costo y alta disponibilidad en el mercado. Están diseñados para operar con una sola fuente de alimentación, en este caso 5V. La hoja de datos del fabricante detalla los siguientes datos:

LM339	
Precio	US \$0.30
Alimentación	2V a 36V
Comparadores	4
Temperatura de operación	0°C a 70°C.

Figura 58 Datos del LM339 extraídos de la hoja de datos

14.2.6.2. Módulo fin de carrera

Existe la posibilidad de que haya objetos que no fueron detectados por los módulos IR. Por esto se desarrolló una segunda línea de detección que consta de un interruptor por contacto presente en la parte frontal de la cortadora, el cual podrá detectar aquellos objetos que colisionan con esta. Se utilizarán tres interruptores, otorgando a los algoritmos tres zonas de detección (60° de apertura por interruptor).

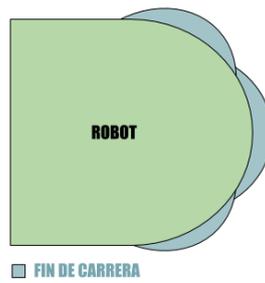


Figura 59 Disposición de los interruptores fin de carrera

El circuito equivalente de cada interruptor consta de un pulsador y un circuito anti-rebote. El costo que involucra es relativamente bajo y agrega una medida de detección adicional fundamental e indispensable.

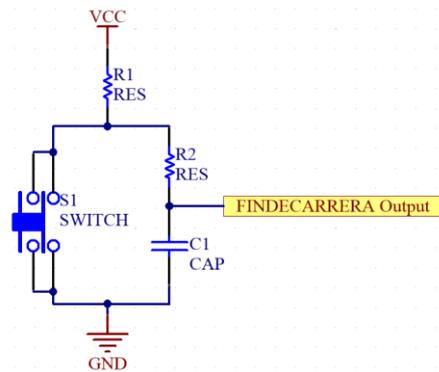


Figura 60 Esquemático del fin de carreras

14.2.6.3. Unidad de procesamiento

Se utilizará un microcontrolador dedicado para manejar las señales de los distintos sensores del módulo, como se puede observar en el siguiente esquema.

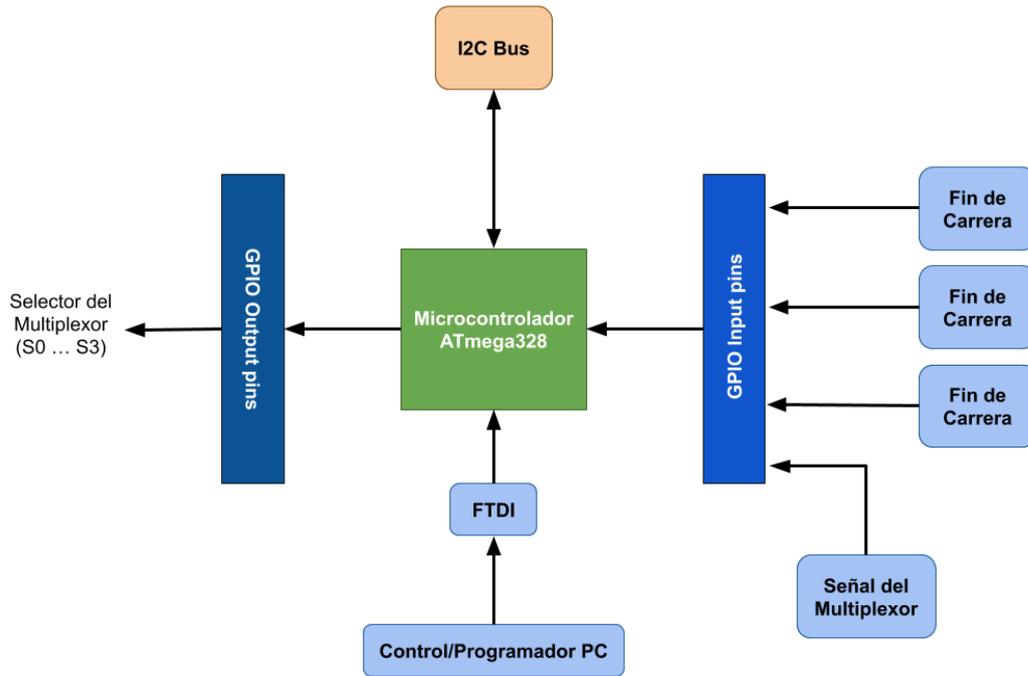


Figura 61 Conexiones con el microcontrolador

Se seleccionó un microcontrolador de la familia ATmega328 para manipular las señales del módulo de detección de objetos por su memoria, velocidad, rango de temperatura de operación, y su bajo costo. Algunas de las características más importantes se ven en la siguiente tabla:

ATmega328	
Precio	US \$1.10
Alimentación	1.8V a 5.5V
Tamaño de la memoria	32 KB
Protocolo de comunicación	I2C
Temperatura de operación	-40°C a 85°C

Figura 62 Datos del ATmega extraídos de su hoja de datos

Debido a que se implementarán 16 módulos IR será necesario el uso de un multiplexor para seleccionar cual de todas las señales presentes se desea leer. Mediante el uso de multiplexores, se reducen los pines necesarios a 5, mientras que en caso contrario se deberían utilizar al menos 16 puertos de entrada para obtener la señal de cada uno de estos sensores (el esquemático se encuentra

en el anexo). Se agrega un LED con su resistencia correspondiente para identificar que este módulo está energizado.

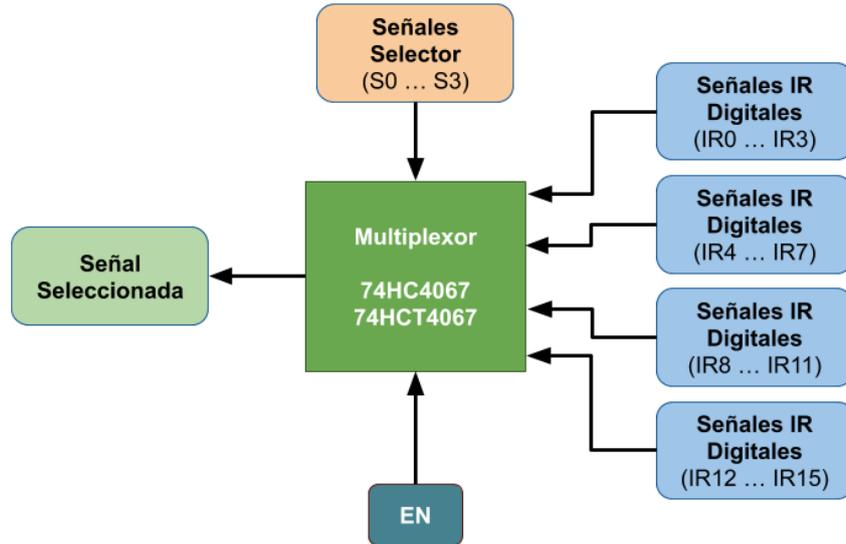


Figura 63 Conexiones del multiplexor del módulo de detección de objetos

Se optó por utilizar el integrado 74HC4067 debido a la cantidad de canales disponibles (16:1) y bajo costo.

74HC4067	
Precio	US \$0.8
Alimentación	4.5V a 5.5V
Canales	16
Temperatura de operación	-40°C a 125°C

Figura 64 Datos obtenidos de la hoja de datos del fabricante

Cada fin de carrera será asignado a un puerto de entrada individual. El microcontrolador leerá la información de cada sensor (el esquemático se encuentra en el anexo) y, en el momento que alguno de ellos se active, iniciará la comunicación con el módulo central mediante el protocolo I2C. Se enviará la información de todos los sensores de manera simultánea.

14.2.7. GNSS

Para poder determinar la posición de la cortadora en tiempo real con el grado de precisión establecido en las especificaciones PER-02 y PER-04, se ha optado por implementar el algoritmo de RTK mediante la utilización de dos dispositivos GNSS, uno de los cuales se encontrará presente en la cortadora, conectado a su microcontrolador correspondiente, y el segundo se encontrará conectado a la estación de carga que, al permanecer fija, representa una base para el sistema de medición diferencial del algoritmo.

14.2.7.1. Receptores GNSS

Los módulos GNSS a utilizar serán los u-blox NEO-M8T. Estos, además de ser de precio accesible para los requerimientos de este producto, permiten ser configurados para enviar información tanto por USB como por UART. Este módulo tiene acceso a distintas constelaciones de satélites que no sean GPS, como por ejemplo GLONASS o Galileo, lo cual permite en todo momento tener una mayor cantidad de satélites disponibles para RTK.

u-blox NEO-M8T	
Precio	US \$70
Alimentación	2.7V – 3.3V
GNSS	GPS GLONASS Galileo
Interfaces	UART USB

Tabla 53 Datos del u-blox NEO-M8T

14.2.7.2. Antena

Si bien el receptor GNSS tiene una antena propia, se recomienda el uso de una antena externa. Para reducir los costos, se ha utilizado una antena activa genérica para GNSS, con conector SMA y cable coaxial (consúltese la Figura 122 para su esquemático de conexión al módulo GNSS).

Dado que los receptores GNSS estarán conectados a su antena en todo momento, de ahora en más se tratará al conjunto receptor-antena como un todo.

14.2.7.3. Conexiones

Si bien ambos receptores GNSS tendrán la misma conexión para su antena, no utilizarán el mismo protocolo de comunicación, dado que el receptor GNSS en la cortadora se comunicará por UART al módulo de posición, mientras que el receptor en la base lo hará mediante USB a la Raspberry Pi. Ambas conexiones para estos protocolos de comunicación se pueden observar la figura Figura 123 en el anexo.

14.2.7.4. Diagrama general de comunicación

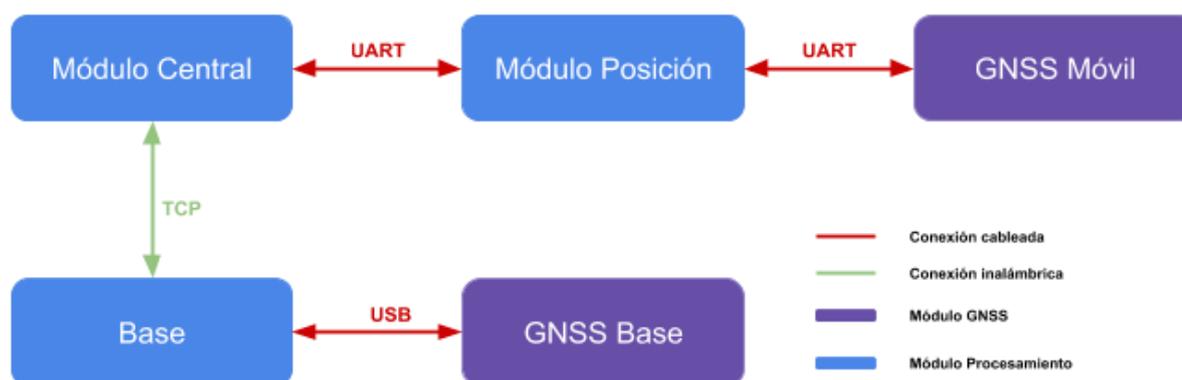


Figura 65 Diagrama general de conexión del posicionamiento

En la figura anterior se observa un diagrama general de conexión de los módulos GNSS y la comunicación entre el módulo posición y el módulo central en la cortadora, y la base.

Debido a los requerimientos de procesamiento, el algoritmo de RTK deberá ser ejecutado por la Raspberry Pi en la base, por lo que será necesario que esta tenga acceso a la información proveniente de ambos GNSS (base y móvil).

La información del GNSS de la base la obtiene mediante una conexión USB que transmite de forma serial los datos sensados por este. Por otro lado, para obtener la información del GNSS en la cortadora el módulo posición deberá capturar los datos, para luego retransmitirlos al módulo central, ya que es el único capaz de conectarse a la base. El módulo central entonces retransmite por última vez los datos del GNSS móvil a la base mediante una conexión TCP.

Cuando la base disponga de ambas observaciones podrá realizar los cálculos necesarios para obtener la posición de la cortadora respecto a la base, y deberá comunicársela al módulo central por el canal ya establecido.

Se debe destacar que todos los canales de comunicación representados son bidireccionales. Esto se debe a que al comienzo del algoritmo RTK, es necesario transmitirle ciertos mensajes a los módulos GNSS que determinan la inicialización de estos, incluyendo información sobre la tasa de muestreo, las constelaciones de satélites a utilizar, entre otros. En esta etapa de inicialización, el flujo de datos es contrario a los mencionado previamente, debiendo ser desde la base a cada módulo GNSS.

14.2.8. Unidad de medición inercial (IMU)

El algoritmo de navegación implementado se basa principalmente en el control de la orientación del equipo, para lo cual resulta indispensable contar con un giróscopo para obtener una medición de dicha variable. Es por esto que se decidió integrar al diseño una IMU que cuente con un giróscopo, de bajo costo y alta disponibilidad.



Figura 66 Módulo MPU6050 a utilizar

El integrado MPU6050 cuenta con estas características, por lo que se procedió a analizar su hoja de datos y se obtuvo la siguiente información:

MPU6050	
Precio	US \$2
Tensión	5V
Comunicación	I2C
Precisión (giróscopo)	0,2°/s

Tabla 54 Datos obtenidos de la hoja de datos del fabricante

Dado que el giróscopo mide velocidad angular, se debe implementar un programa que integre dicha velocidad entre dos instantes de tiempo definidos para obtener la orientación relativa del equipo con respecto a una orientación inicial. El programa de medición de orientación, así como también de obtención de la orientación inicial, será desarrollado en la sección "Software". La comunicación con el módulo central se realizará a través de I2C.

14.2.9. Módulo central

Tomando en consideración el análisis realizado en la factibilidad tecnológica del proyecto, se decidió implementar el módulo central con un microcontrolador ESP32. La función principal de este módulo es ejecutar los programas principales para el funcionamiento del equipo tanto en modo manual como en modo autónomo. Además, debe monitorear constantemente los otros módulos y controlar las distintas variables que intervienen en el funcionamiento de la cortadora de césped para verificar que cada proceso se ejecute de manera correcta.

El módulo consiste en una placa que contiene al microcontrolador, sus respectivos desacoplos, un puerto micro USB y un programador FTDI para cargar el programa y todas las conexiones de entrada y salida a través de pines hembras y machos. Además, cuenta con dos pulsadores para reiniciar el programa y apagar el equipo y con distintos LEDs para permitir un monitoreo básico de forma visual por parte del usuario. El esquemático se encuentra en el anexo del informe.

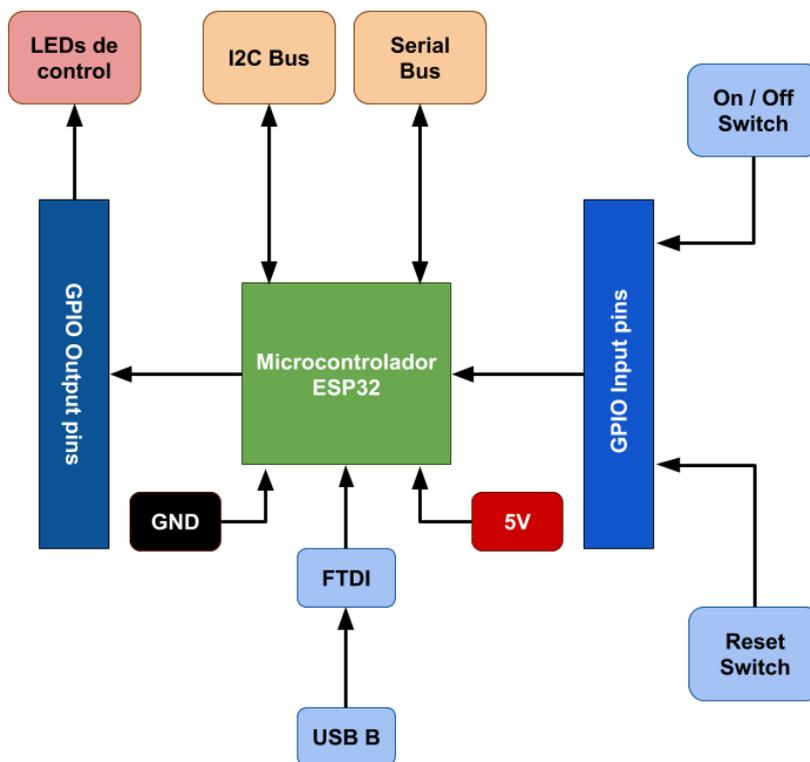


Figura 67 Diagrama en bloques del módulo central

14.2.10. Base

14.2.10.1. Diagrama General de Conexión

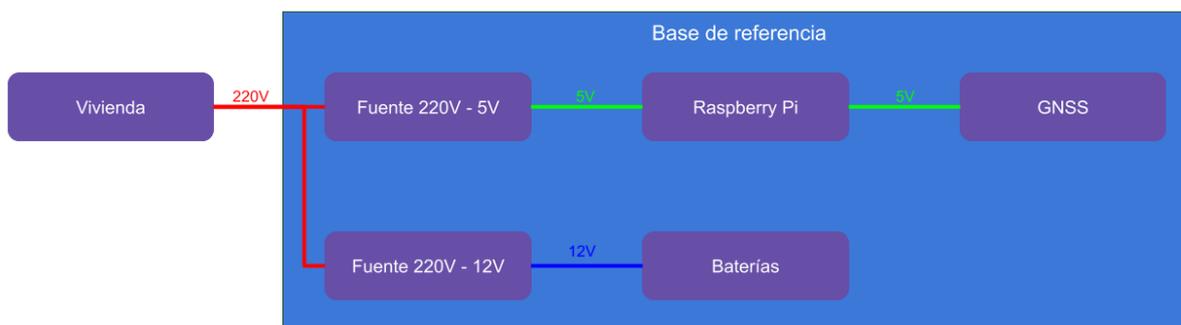


Figura 68 Diagrama en bloques de los módulos de la base

La principal función de la base es actuar como referencia para la cortadora de césped. Además, cuenta con un módulo GNSS y realiza el procesamiento del algoritmo de posicionamiento con la librería RTK. Como se puede observar en la figura anterior, la base requerirá para su funcionamiento de una entrada de 220V. En el caso de la Raspberry Pi, encargada del procesamiento de la base, deberá ser alimentada con 5V, y a su vez alimenta al módulo GNSS.

La fuente de 220V a 5V a utilizar será el modelo TDX – 0502000 de marca Smart Tech. La elección corresponde a la posibilidad de entregar 2A de corriente (suficiente para alimentar la Raspberry Pi) y a su bajo costo de US \$2.

Por otro lado, la fuente de 220V a 12V a utilizar será el modelo MFS – 1007 de la marca Microfast. Esta es una fuente switching capaz de entregar 7A, permitiendo una carga rápida de las baterías utilizadas en la cortadora. El precio de esta fuente es de US \$12, contemplado dentro del presupuesto del producto final.

14.3. Software

14.3.1. Algoritmo para el módulo de posición

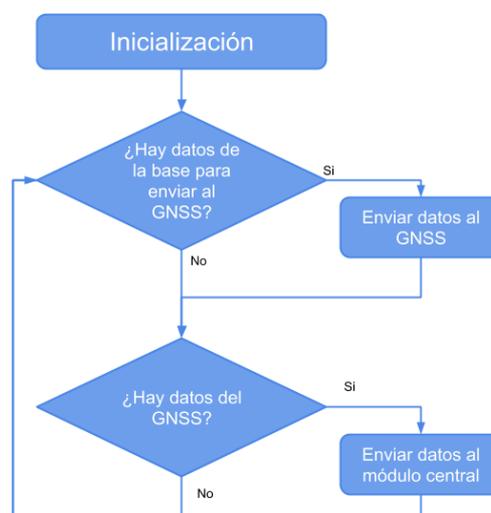


Figura 69 Diagrama en bloques del software del módulo de posición

El microcontrolador dedicado a la posición de la cortadora no realiza cálculos, sino que funciona a modo de administrador de la información. Se comunica con el GNSS presente en la cortadora para tomar datos de este, y así poder redirigirlos a la base, que se encargará de ejecutar el algoritmo de RTK e informarle al módulo central la posición resultante. En ciertas instancias, es necesario que la base, al ejecutar RTK, le envíe ciertos mensajes al GNSS presente en la cortadora. Primero deberá enviárselos al módulo de posición y este a su vez los redirigirá al GNSS.

14.3.2. Algoritmo de posición para la base

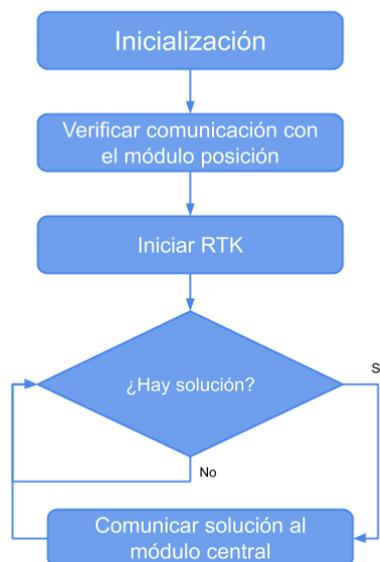


Figura 70 Diagrama en bloques del software de la base para la posición

La base tiene un flujo de programa bastante sencillo, deberá poder iniciar la comunicación con el microcontrolador que representa el módulo central en la cortadora y verificar que se están transmitiendo datos. Una vez que la base pueda ver los datos del GNSS de la cortadora y de sí misma, ejecutará el algoritmo de RTK y, si se obtiene una solución en el proceso, es decir que se han hecho los cálculos para tener la posición relativa de los GNSS, se los comunica devuelta al módulo posición.

14.3.3. RTK

Para RTK se utilizará la librería de código abierto y con licencia para comercializar *RTKLIB*⁴. La misma es ejecutable desde línea de comandos en un dispositivo que utilice Unix, por lo que será ejecutada desde la Raspberry Pi presente en la base. Además de los flujos de datos de los GNSS, explicados previamente, requiere para su correcto funcionamiento la configuración de varios parámetros de inicialización. La lista completa de dichos parámetros se puede encontrar en el anexo, pero a continuación se presentarán algunos de los parámetros más significativos del algoritmo.

Parámetro	Valor	Descripción
pos1-posmode	kinematic	Se refiere al modo de ejecución de la librería. A pesar de llamarse RTKLib, la librería puede implementar otros algoritmos de posicionamiento. Este parámetro indica que se ejecutará el modo RTK.
pos1-frequency	l1	Las señales satelitales se transmiten en tres posibles frecuencias, denominadas l1, l2 y l5. Los módulos GNSS utilizados solo trabajan con la

⁴ Accesible en <http://www.rtklib.com/>

		frecuencia I1, por lo que se debe aclarar esto en el parámetro. Otros módulos GNSS capaces de trabajar con más frecuencias se exceden del alcance económico de este producto.
pos1-soltype	forward	Define en que orden se deberá aplicar el filtro de Kalman del algoritmo para obtener resultados de posición. Al requerir que sea en tiempo real, este valor solo puede ser 'forward'.
pos1-elmask	30	Ángulo en grados con respecto al horizonte que debe superar un satélite para que sus datos sean considerados en el algoritmo. Este valor asegura tener una amplia selección de satélites, descartando aquellos más cerca del horizonte, los cuales no solo son más capaces de encontrar obstáculos, sino que también tienen el mayor trayecto en la atmósfera, por lo que son más propensos a errores.
pos1-sateph	brdc	Este parámetro, elegido en 'broadcast', refiere a de donde se obtendrá la información de las efemérides, que son las órbitas aproximadas de cada satélite de posicionamiento. Seleccionado de esta manera obtiene estos datos del GNSS, sin tener que acceder a internet para solicitarlos.
pos1-navsys	13	Indica que constelaciones de satélites se utilizarán. El número 13 representa la utilización de GPS, GLONASS y Galileo, constelaciones de cobertura mundial y aquellas legibles por los módulos de GNSS.
inpstrX-type	serial	Indica que el flujo de datos 1 es de forma serial
inpstrX-path	TTYACMX:230400:8:n:1:off	Indica donde se tomará uno de los flujos de datos necesarios para correr el algoritmo, indicando el puerto de conexión, los baudios, el tamaño del mensaje, la paridad, la cantidad de bits de freno y si hay redundancia.
inpstr1-format	ubx	Indica que los datos de las mediciones del GNSS son en el formato establecido por u-blox, llamado ubx.
oustr1-format	enu	Indica que la solución del algoritmo, es decir, la posición, debe comunicarse en el sistema enu, que corresponde a un sistema de ejes donde el eje x apunta al este, el eje y hacia el norte y el eje z hacia arriba.

Tabla 55 Parámetros más significativos de RTK

14.3.4. Algoritmo de medición de orientación relativa

El valor de la orientación del equipo se obtiene del giroscopio presente en la IMU MPU6050 de manera indirecta. Esto se debe a que dicho sensor mide velocidad angular, parámetro que debe integrarse para obtener la orientación o posición angular deseada. Se implementó un driver denominado

“OrDRV” para interactuar con el MPU6050 y procesar la información que devuelve el giroscopio mediante el protocolo I2C. El proceso de medición se realiza de la siguiente forma:

1. En la inicialización del programa principal, se inicializa el MPU6050 y se realiza la calibración correspondiente.
2. En cada ciclo del Main del Módulo Central, el driver le solicita una medición de la velocidad angular al giroscopio.
3. Cuando se obtienen dos mediciones de velocidad angular, se realiza la integración en el intervalo de tiempo entre ambas mediciones.
4. Se repite el proceso hasta obtener diez mediciones y se filtra la muestra.
5. Se obtiene el valor medio de la muestra ya filtrada, se aplica una transformación para lograr un cambio de coordenadas y se almacena como valor actual de la orientación en el driver.
6. Cada vez que se completa un temporizador de 10ms, el Módulo Central toma de OrDRV el valor de la orientación.

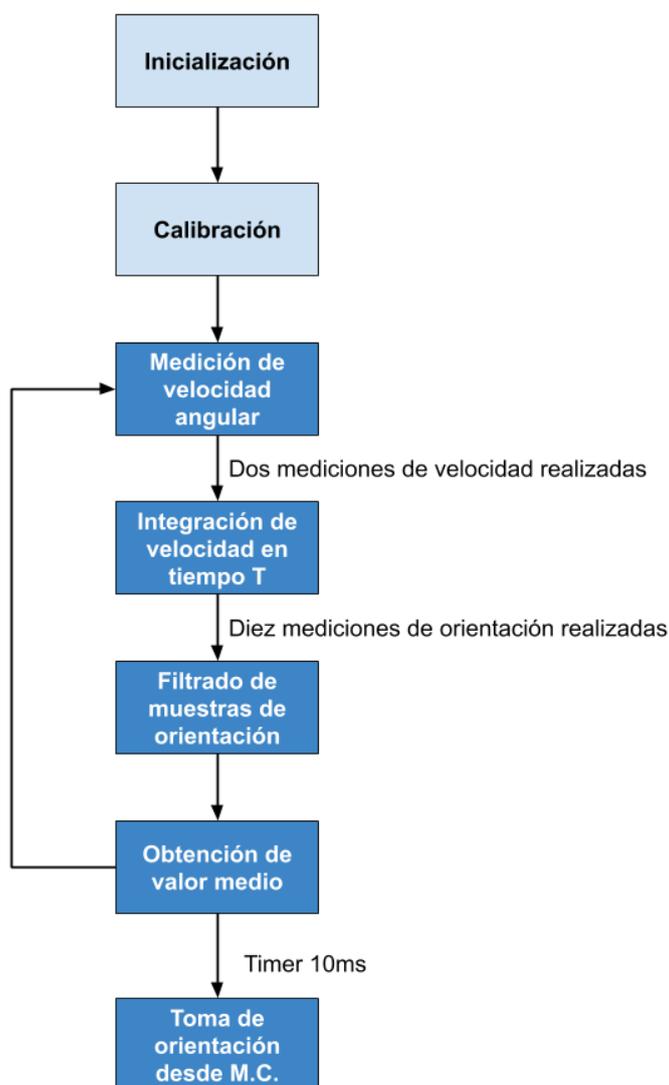


Figura 71 Diagrama de flujos del driver OrDRV

Si bien la medición de la orientación es válida, es importante destacar que se trata de una medición relativa con respecto a la orientación inicial en la cual se encuentra el equipo al momento de inicializar el módulo. Es por esto que en el Modo Autónomo existe una función para obtener la orientación inicial absoluta a través de las mediciones de posición obtenidas desde el módulo de posicionamiento.

Principales funciones del driver de orientación:

Nombre	MPU_initialize()
Descripción	Verifica que el MPU esté activo y funcionando. Pide al módulo la información del registro "STATUS" para verificar su estado. Pone en funcionamiento el giróscopo.
Parámetros de entrada	Ninguno
Salida	True: el MPU se inicializó correctamente. False: Error en la inicialización.

Tabla 56 Detalles de la función MPU_initialize

Nombre	MPU_setGyroOffset()
Descripción	Genera la calibración automática del integrado.
Parámetros de entrada	Ninguno
Salida	True: el MPU se calibró correctamente. False: Error en la calibración.

Tabla 57 Detalles de la función MPU_setGyroOffset

Nombre	MPU_getYawPitchRoll(*int yaw, *int pitch, *int roll)
Descripción	Integra dos valores de velocidad angular para obtener la orientación, filtra muestras de 10 valores cuando se completan y devuelve el valor medio de la orientación en cada eje.
Parámetros de entrada	Punteros a variables que almacenan los valores de orientación en los tres ejes.
Salida	True: la medición se realizó correctamente. False: error en la medición.

Tabla 58 Detalles de la función MPU_getYawPitchRoll

14.3.5. Medición de velocidad de motores de movimiento

La medición de las RPM de los motores de movimiento será realizada mediante un sistema de control en variables de estado, utilizando la corriente consumida por los mismos como observador.

El sistema puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix}$$

Donde w es la velocidad angular del rotor del motor, i la corriente consumida, R es la resistencia de la armadura, B el índice de fricción viscosa, L la inductancia de la armadura, K la constante de EMF, y J la inercia del rotor.

Con el fin de obtener parámetros representativos de los motores utilizados se realizaron mediciones de cada motor por separado y luego se estimó un sistema de segundo orden con los datos de entrada – salida obtenidos, siendo la tensión de alimentación la entrada y la corriente consumida la salida.

Los valores promedio (adimensionales) obtenidos fueron:

- B: 1,1 e-5
- L: 2,38 e-3
- R: 4,24
- K: 0,3
- J: 0,97 e-3

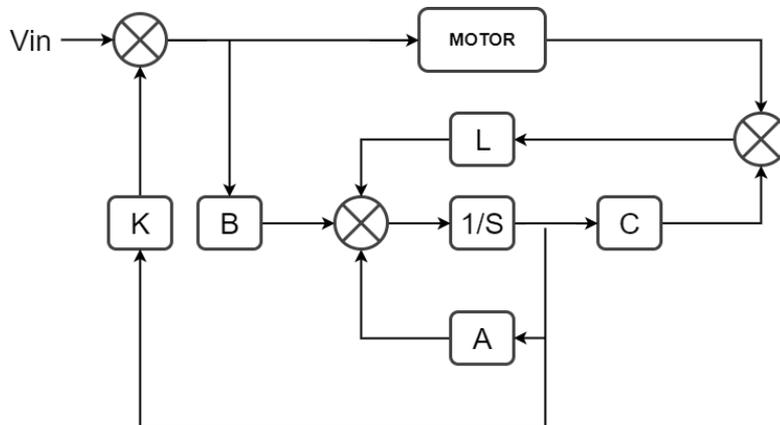


Figura 72 Diagrama en bloques del sistema de control utilizado

Paso siguiente, se realizó un estudio de observabilidad y controlabilidad con el fin de garantizar que la medición de velocidad sea estable, obteniendo como resultado que tanto la matriz de controlabilidad como la de observabilidad son de orden 2, es decir, estables. Luego se calcularon

las ganancias del observador, colocando los polos 20 veces más rápidos que los polos del sistema a lazo abierto. Las ganancias obtenidas fueron:

- L1 = -1,1975e+05
- L2 = 3,3849e+04

A continuación se cambió la matriz C (previamente [0 1]) por una matriz C2 que considere la velocidad angular como salida, es decir [1 0]. Luego se extendió el sistema para conseguir un control integral sobre la variable de control nueva w , con el fin de garantizar error en estado estacionario nulo. Sobre el sistema nuevo A, B, Ci y D, se impusieron las siguientes condiciones de respuesta temporal:

- Tiempo de establecimiento: 1 s
- Sobrepico: 10%

Logrando como resultado las siguientes ganancias:

- K1: -0,3001
- K2: -4,2553
- K3: 0,0001

Por último, se realizó un análisis de estabilidad del sistema completo, definido por

$$\begin{aligned}
 u &= -k\hat{x} + k_i x_i \\
 \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{\hat{x}} & \dot{x}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Ax + B(-k\hat{x} + k_i x_i) \\ (A - LC)\hat{x} + B(-k\hat{x} + k_i x_i) + LCx \\ -C_i\hat{x} + w_r \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Con

$$\tilde{x} = x - \hat{x}$$

Obteniendo nuevamente que el sistema es estable, estando todas las singularidades del mismo en el semiplano izquierdo del eje jw , dando como resultado la posible medición de la velocidad de los motores a partir de la corriente consumida por los mismos.

14.3.6. Control de motor de corte

Para el motor de corte se implementará un accionamiento de tipo "ON/OFF" a través de una señal lógica que se activará o desactivará dependiendo del modo de operación y de alertas de seguridad. La señal de PWM estará siempre activa, con una frecuencia de 150 Hz y un Duty Cycle del 65%, lo cual genera la velocidad de giro de 10500 RPM necesaria para el funcionamiento correcto de la cortadora. Esta señal se enmascara con la señal lógica de control a través de una compuerta AND y controla el motor de corte.

Las distintas alertas que generan una señal de control baja son las siguientes:

- Objeto detectado
- Equipo levantado
- Consumo de corriente elevado de cualquier motor

Las señales de alerta se comparan mediante una compuerta NOR para generar la señal de control, como se muestra en el siguiente esquema:

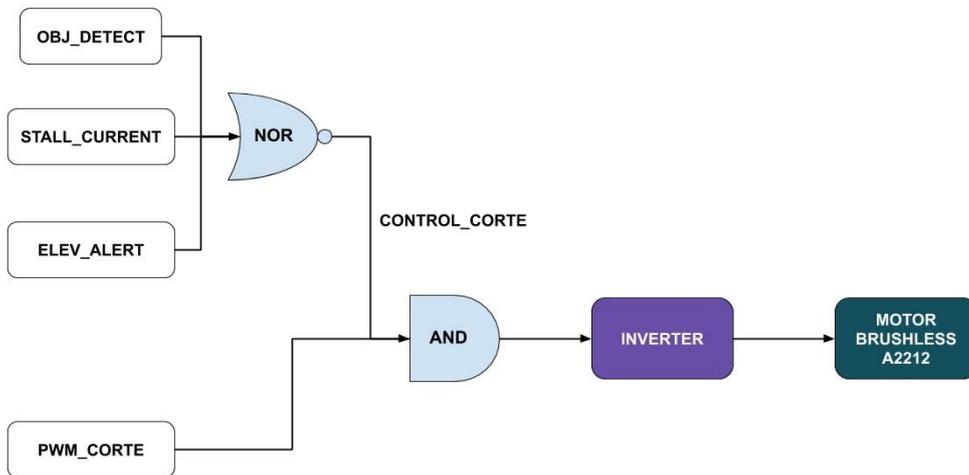


Figura 73 Diagrama en bloques del control del motor de corte

14.3.7. Control de motores por orientación

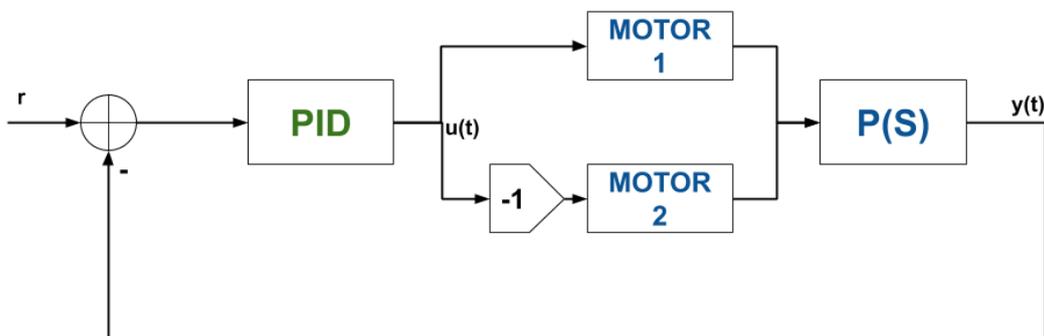


Figura 74 Diagrama en bloques del sistema de control de orientación de motores

El control de los motores de movimiento se diseñó según se muestra en la figura anterior. Se toma una referencia de orientación r y se genera una señal de error que ingresa al bloque PID para

generar la señal de control de los motores. Las constantes y los polos del PID se obtienen con una función de calibración propia del driver de control "Motor".

El bloque PID genera una señal de control $u(t)$ que, mediante una transformación lineal adecuada, modifica el Duty Cycle de cada motor a fin de minimizar el error presente entre la orientación deseada y la medida. Para cambiar de orientación los motores deben realizar acciones opuestas, es decir, cuando uno acelera el otro debe frenar y viceversa. Es por esto que se incluye el bloque con la constante -1.

Las señales entregadas a cada motor se traducen en el movimiento de la planta (la cortadora de césped) representada con $P(S)$, de la cual se toma como salida la medición de la orientación actual para cerrar el lazo.

A continuación, se describen las principales funciones del driver de control de motores:

Nombre	Motor_move(MOTOR_ACTION movement, MOTOR_SPEED mtr_speed)
Descripción	Activa los motores para moverse en línea recta a una velocidad determinada. Toma como referencia la orientación en la cual se encuentra al momento de iniciar el movimiento.
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • movement: variable de tipo MOTOR_ACTION que indica si el movimiento es hacia adelante o hacia atrás. • mtr_speed: variable de tipo MOTOR_SPEED que indica la velocidad con la cual debe realizarse el movimiento.
Salida	Ninguna

Tabla 59 Descripción de la función Motor_move

Nombre	Motor_rotate(MOTOR_ACTION movement, int rot_degrees, MOTOR_SPEED mtr_speed)
Descripción	Activa los motores para rotar en un sentido a una velocidad determinada. Toma como referencia la orientación que se requiere alcanzar cuando finalice la rotación, es decir, la orientación actual más o menos los grados a rotar. La rotación se realiza sobre el centro de masa del equipo, para lo cual los sentidos de giro de las ruedas deben ser opuestos.
Parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • movement: variable de tipo MOTOR_ACTION que indica si debe rotar contra o a favor de las agujas del reloj. • rot_degrees: variable de tipo "int" que indica cuantos grados hay que rotar. Si es 0, implica que la rotación no será controlada y seguirá rotando hasta que se pare por el usuario. • mtr_speed: variable de tipo MOTOR_SPEED que indica la velocidad con la cual debe realizarse el movimiento.
Salida	Ninguna

Tabla 60 Descripción de la función Motor_rotate

Nombre	Motor_stop ()
Descripción	Detiene ambos motores instantáneamente.
Parámetros de entrada	Ninguno
Salida	Ninguna

Tabla 61 Descripción de la función Motor_stop

Nombre	Motor_control()
Descripción	Implementa el control por orientación. Toma la orientación desde el módulo OrDRV, la compara con la referencia para generar la señal de error, implementa el PID, obtiene la señal de control u(t) y genera las señales PWM para aplicar sobre los motores.
Parámetros de entrada	Ninguno, los parámetros utilizados son globales para todo el driver.
Salida	Variable de tipo CONTROL_STATES indicando el estado del control: <ol style="list-style-type: none"> 1. Si se trata de un movimiento en línea recta, el control nunca finaliza y la salida es siempre CONTROL_WORKING.

	<ol style="list-style-type: none"> 2. Si se trata de una rotación y no alcanzó la orientación objetivo, la salida es CONTROL_WORKING. 3. Si alcanzó la orientación objetivo (con un margen de error parametrizable), la salida es CONTROL_FINISHED.
--	---

Tabla 62 Descripción de la función Motor_control

14.3.8. Módulo central

El módulo central cumple las funciones de ejecución de los programas de modo manual y autónomo. Se implementó una programación orientada a eventos con funciones no bloqueantes, y una estructura de código basada en máquinas de estados con distintas jerarquías.

Una particularidad de este diseño es que todos los eventos externos son detectados realizando un “poll” en el resto de los módulos del equipo desde el módulo central. La elección de este método frente a una recepción de eventos por interrupciones se debe a:

- Al tratarse de un diseño modular, existen numerosas fuentes de interrupciones que podrían ejecutarse en simultáneo, complicando la implementación del código para poder atender cada una. Al consultar cada módulo en un tiempo definido, el módulo central verifica de manera organizada que cada evento es recibido y procesado.
- La velocidad de movimiento del equipo brinda una ventana de tiempo suficiente para aplicar este método en cualquiera de sus módulos.

Independientemente de qué modo y qué máquina de estados esté funcionando, existe un conjunto de funciones generadoras de eventos (representadas como un bloque llamado “Event Generator”) que debe ejecutarse en cada ciclo de la función “main” del módulo central. Por este motivo, resulta crucial cumplir con la condición de utilizar funciones no bloqueantes en todo momento, ya que de lo contrario se podrían perder eventos externos.

En la siguiente figura se ilustran las máquinas de estado del programa. De acuerdo a los eventos recibidos, el programa se encontrará dentro de una máquina de estados distinta. El hecho que una máquina de estados tenga menor jerarquía que otra implica que la primera es un estado de la segunda. Por esto, para llegar a la FSM actual el programa debe atravesar todas sus superiores, siempre pasando por el *Event Generator*.

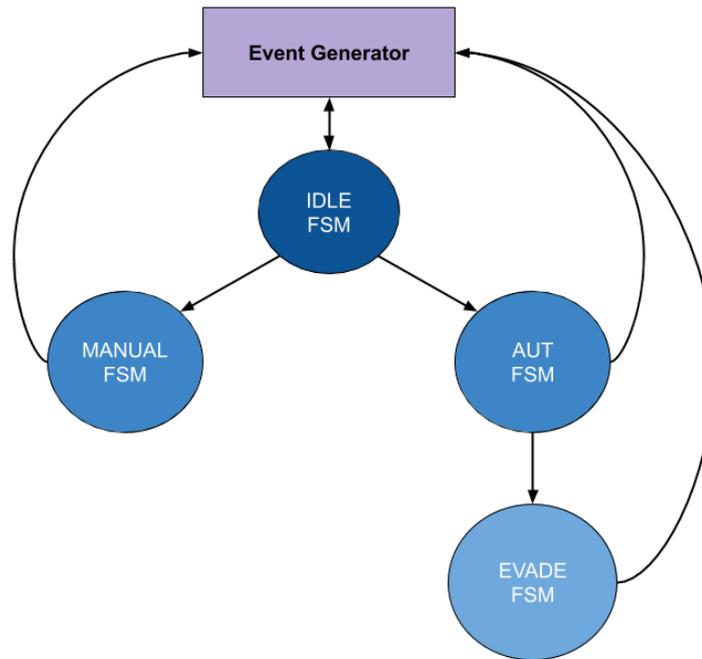


Figura 75 Máquinas de estado

Para manejar cada bloque dependiente del módulo central, se implementaron diversos drivers. Estos se diferencian según su nivel de abstracción, de manera de facilitar la escalabilidad del producto si el proyecto así lo requiere en un futuro. El siguiente diagrama permite visualizar los drivers y sus niveles de abstracción utilizados en el programa.

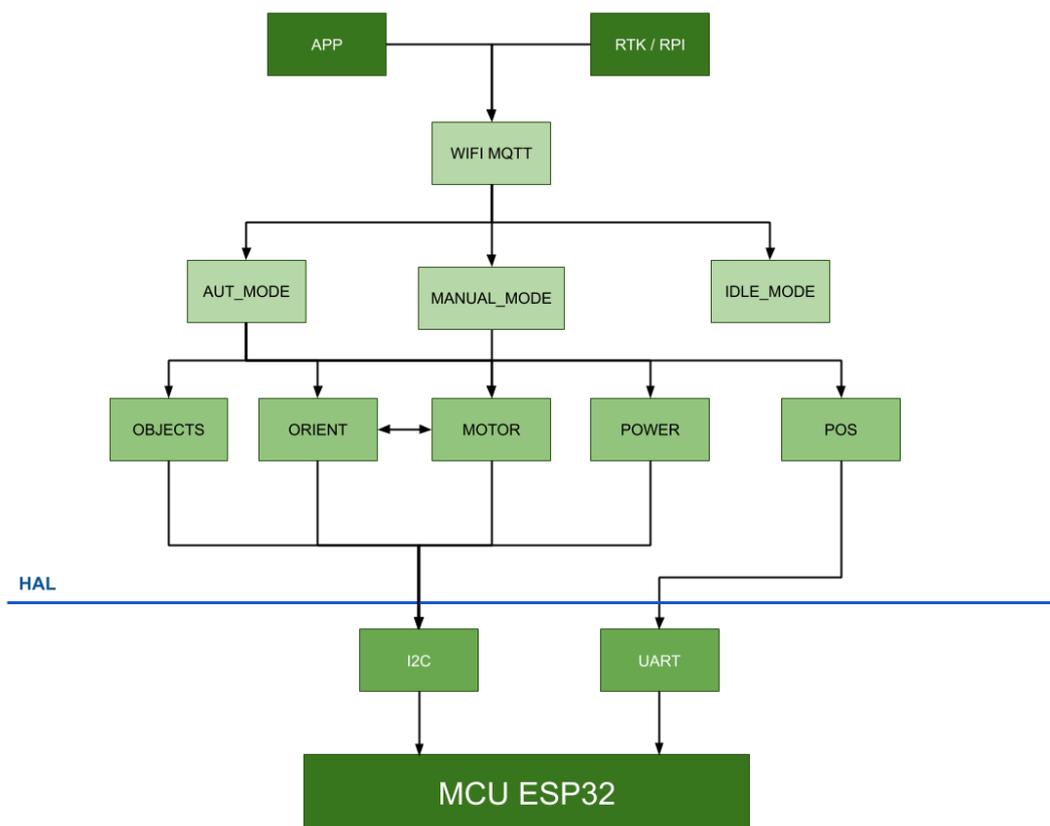


Figura 76 Diagramas en bloques de los drivers utilizados

14.3.8.1. Modo Idle

El programa entrará en modo Idle bajo tres condiciones:

1. Encendido del equipo.
2. Cambio a modo Idle forzado por el usuario desde la web app.
3. Finalización del recorrido realizado en el modo Autónomo.

En este modo, el programa ejecutará una máquina de estados denominada “*IDLE FSM*”. Esta cuenta con tres estados: “*IDLE_MODE*”, “*MANUAL_MODE*” y “*AUT_MODE*”. En caso de que se encuentre en cualquiera de los últimos dos, pasará a ejecutar la FSM del módulo que corresponda.

Dentro de *IDLE FSM*, sólo se recibirán eventos provenientes del driver wifi MQTT, correspondientes a acciones del usuario en la web app. Si el bloque *Event Generator* devuelve eventos provenientes de otras fuentes, simplemente serán omitidos.

El diagrama de estados y eventos se muestra a continuación:

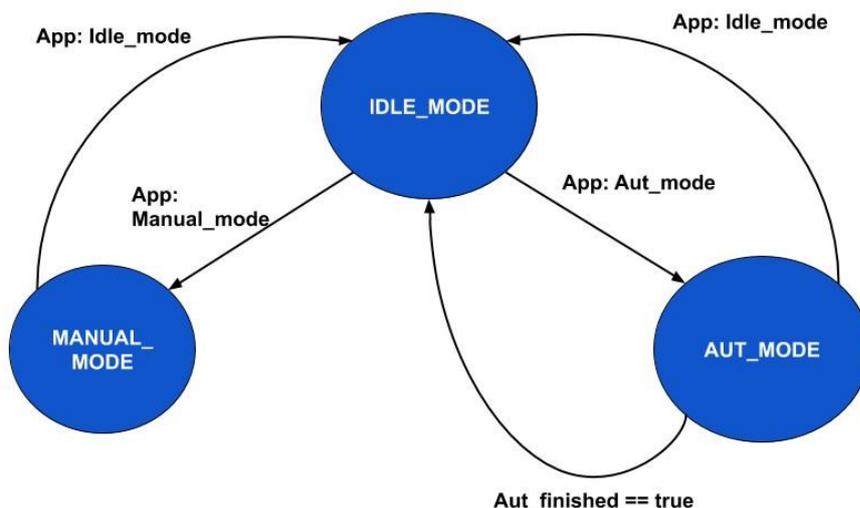


Figura 77 Diagrama de estados y eventos

14.3.8.2. Modo Manual

El programa entrará en Modo Manual siempre que se encuentre en Modo Idle y el usuario seleccione este modo desde la web app. De igual manera, solo se podrá salir de este modo cuando el usuario seleccione el Modo Idle en la web app.

Se ejecutará la máquina de estados denominada “MANUAL FSM”, la cual cuenta con tres estados y recibe eventos desde el módulo wifi MQTT (que a su vez los recibe desde la web app).

El diagrama de estados y el flujo del programa en este modo se muestran a continuación:

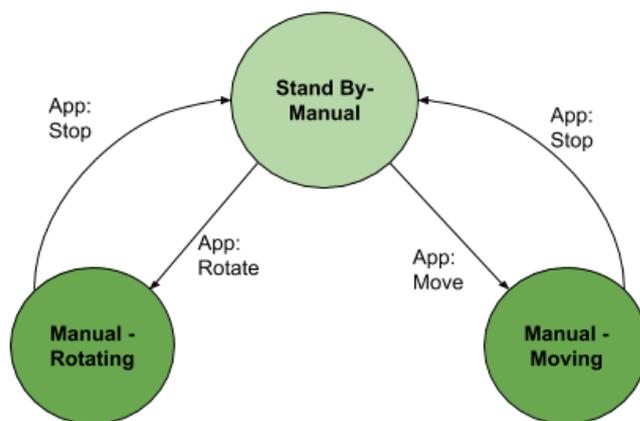


Figura 78 Diagramas de estados y flujo del modo manual

- *Stand By – Manual*: En este estado, el programa espera la interacción del usuario desde la web app. Todos los motores están apagados y no realiza mediciones de ningún tipo. Puede recibir dos eventos, generados cuando el usuario presiona los distintos botones en la interfaz gráfica:

- Rotate: Se activan las funciones del driver Motor para rotar en el sentido indicado en el evento y se pasa al estado Manual – *Rotating*.
- Move: Se activan las funciones del driver Motor para avanzar o retroceder y se pasa al estado Manual – *Moving*. Dado que se busca un movimiento en línea recta, se toma como referencia la orientación actual para mantenerla durante el avance o retroceso.
- Manual – *Rotating*: El equipo se encuentra rotando en el sentido indicado y continúa hasta recibir el evento “*Stop*” desde el servidor de la web app, momento en el cual frena los motores y retorna al estado *Stand By*. Este evento se genera cuando el usuario deja de presionar el botón que había iniciado la rotación.
- Manual – *Moving*: El equipo mueve en el sentido indicado y continúa hasta recibir el evento “*Stop*” desde el servidor de la web app, momento en el cual frena los motores y retorna al estado *Stand By*. En cada ciclo del programa, se ejecuta la función de control del driver Motor para mantener la orientación inicial que fue tomada como referencia al inicio del movimiento.

Si el usuario selecciona la opción de “Cortar” presente en la web app en este modo, se enciende el motor de corte y se realiza el mismo flujo, pero mientras dicho motor está encendido. De esta forma, el usuario puede utilizar el equipo para realizar cortes de césped de forma “manual” por cualquier motivo que lo desee. En caso de que la cortadora se levante del suelo, se generará una alerta que interrumpirá el programa, apagará el motor de corte y forzará al usuario a reiniciar el proceso.

14.3.8.2.1. Grabado de perímetro

La función principal del modo manual es delimitar el perímetro dentro del cual trabajará la cortadora de césped de manera autónoma. El equipo reporta la posición actual al servidor cada 500ms, tras obtenerla del módulo posición, y el usuario puede visualizarla en la web app en tiempo real.

Si se selecciona en la web app la opción de “Grabar perímetro”, el servidor guardará en un arreglo dinámico cada valor de posición recibido desde el equipo hasta que se desactive la función “Grabar perímetro”. Una vez finalizada la grabación, el servidor mostrará en la web app el perímetro guardado y procesará los valores de posición para obtener el recorrido a realizar en modo autónomo.

Desde el punto de vista del usuario, para grabar un perímetro se deben seguir los siguientes pasos:

1. Encender el equipo e iniciar sesión en la aplicación.
2. Colocar el sistema en modo manual.
3. Seleccionar la opción “Grabar perímetro”.
4. Controlar con el joystick en pantalla los movimientos de la cortadora y trazar el perímetro del área a cortar de forma autónoma.
5. Deseleccionar la opción “Grabar perímetro” para guardar la traza realizada.
6. Visualizar el perímetro guardado en pantalla.

14.3.8.3. Modo Autónomo

Dentro de este modo se ejecutará la máquina de estados denominada “AUT FSM”, con el objetivo de recorrer toda el área contenida dentro de un perímetro particular seleccionado por el usuario en la web app.

El programa entrará en Modo Autónomo siempre que se encuentre en Modo Idle y el usuario seleccione el cambio de modo desde la web app. Para volver a Modo Idle, el usuario debe seleccionar el cambio de modo o esperar a que finalice el recorrido, momento en el cual se realiza el cambio de modo automáticamente.

El diagrama de estados y el flujo del programa en este modo se muestran a continuación:

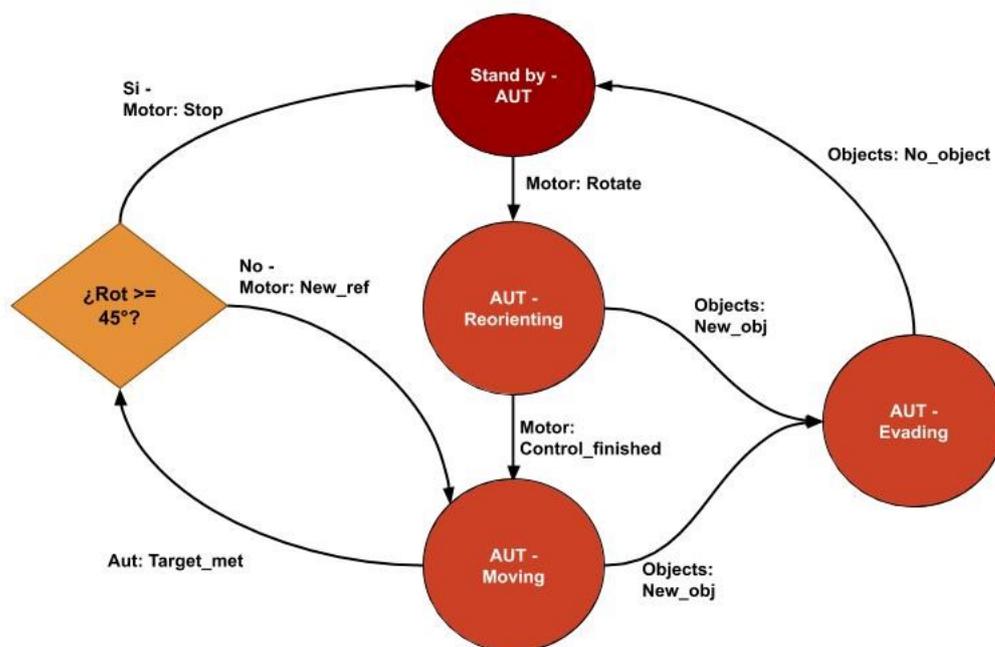


Figura 79 Diagrama de estados del modo autónomo

- *Stand By – AUT*: En este estado, el equipo se encuentra quieto con los motores apagados y procesa las variables del sistema para determinar el nuevo objetivo y los grados a rotar del equipo para orientarse hacia el mismo. En caso de ser necesario, se solicita un nuevo bloque de puntos (objetivos) a la web app. Obtenida la orientación deseada, envía los grados a rotar al driver de control de motores, que genera un evento para indicar que comenzó la rotación y la FSM pasa al estado *AUT – Reorienting*.
- *AUT – Reorienting*: La cortadora de césped se encuentra rotando sobre su centro de masa de manera controlada, hasta alcanzar la orientación de referencia establecida como objetivo. Al lograr dicha orientación, el driver “Motor” genera un evento para indicar que finalizó el control de manera correcta y se debe pasar al estado *AUT – Moving*.
 - Si en algún momento de la rotación se detecta la presencia de un objeto, el driver “Objects” generará un evento para interrumpir el movimiento actual y evadir el objeto detectado, ingresando en el estado *AUT – Evading*.

- AUT – *Moving*: El equipo se encuentra moviéndose para adelante en busca del nuevo objetivo. Lee constantemente la posición y, si alcanza el punto deseado (con un margen de error definido), lo indica al sistema y toma como objetivo el siguiente punto. El movimiento se realiza de forma controlada para mantener la orientación de referencia, según se indica en la sección “Control de motores por orientación”. Si la orientación que debe tomar para alcanzar el nuevo objetivo difiere en 45 grados o menos de la actual, cambia la referencia de orientación y continúa con el movimiento controlado sin cambiar de estado ni frenar los motores. En caso contrario, frena y vuelve a *Stand By – AUT* para repetir el flujo con el nuevo objetivo.
 - Si en algún momento del movimiento se detecta la presencia de un objeto, el driver “*Objects*” generará un evento para interrumpir el recorrido y evadir el objeto detectado, ingresando en el estado AUT – *Evading*.
- AUT – *Evading*: En este estado se busca evadir el objeto detectado para poder continuar con el recorrido de forma tal de saltar la menor cantidad de puntos posibles. Se ejecuta la máquina de estados “*Evading FSM*”.

14.3.8.3.1. Evasión de objetos

La evasión de objetos se basa en el algoritmo “Bubble Sort”, desarrollado y explicado en el anexo del informe. El Modo Autónomo contará con un objeto denominado “*Obj_data*”, compuesto por los siguientes parámetros:

- *State*: Indica si hay algún sensor activo.
- *Sensor_type*: Indica si el sensor activo es FC o IR.
- *Sensors*: Arreglo que contiene el estado de cada sensor, indicando con “1” un estado activo y con “0” inactivo.

En cada ciclo de la función “main” del Módulo Central se solicita información al Módulo de Objetos y se actualizan los parámetros de *Obj_data*. En cada ciclo del Modo Autónomo se analizará el parámetro *State* del objeto mencionado y, en caso de que indique la presencia de un objeto, forzará a que el programa ingrese a la máquina de estados “*Evading FSM*” y ejecute el algoritmo de evasión. En el siguiente diagrama se muestra la lógica de este:

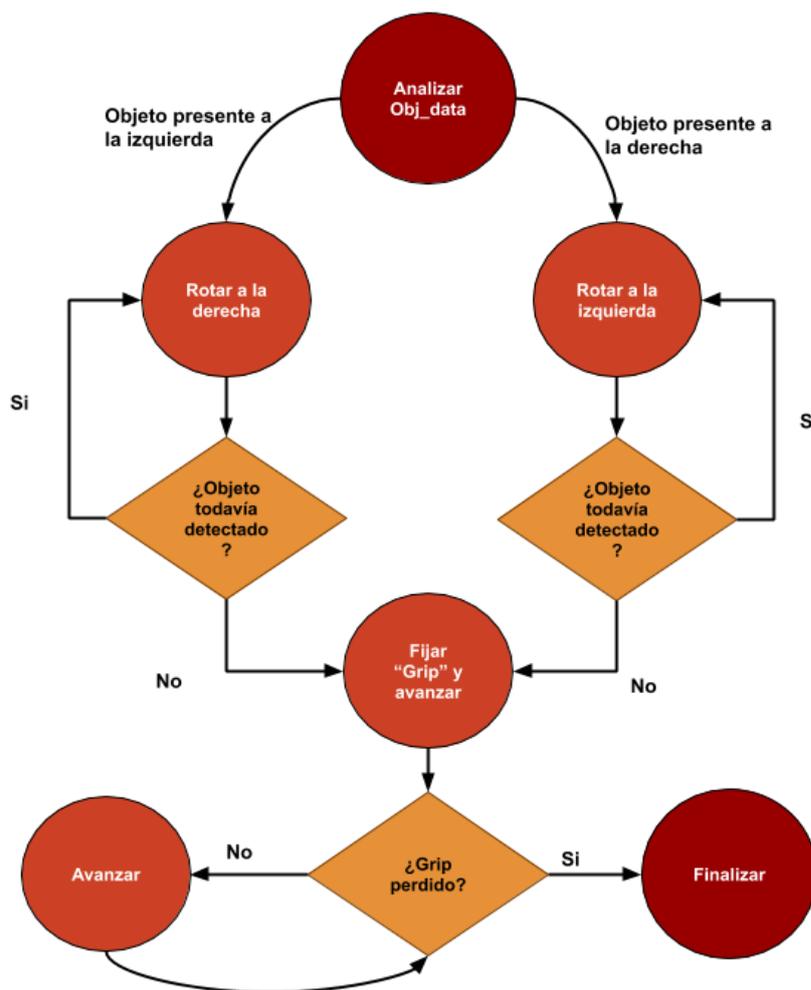


Figura 80 Algoritmo de evasión

Siempre que se encuentre un objeto de un lado del frente de la cortadora, esta rotará en sentido contrario hasta que ningún sensor se encuentre activo, con la excepción de los asignados como *"Grip"*. Estos corresponden a los dos sensores que se encuentran sobre el costado de la cortadora y no sobre el semicírculo frontal, a diferencia del resto. El objetivo de los sensores *Grip* es el de limitar el avance del equipo tras la rotación, de manera tal de lograr un movimiento preciso y perder la menor cantidad de superficie sin cortar. Luego de rotar, la cortadora avanzará hasta que el sensor de *Grip* se desactive, indicando que el objeto ya está lejos y no supone un obstáculo. Cuando esto suceda, el programa volverá a recorrer el flujo normal del Modo Autónomo y retomará la trayectoria.

14.3.8.3.2. Generación de recorrido

Para obtener los puntos dentro del perímetro que debe visitar la cortadora de césped para garantizar un área de corte superior al 95% se realizó un algoritmo en Python, que será ejecutado en el backend de la web app.

Para comenzar el proceso, el algoritmo recibe los puntos del perímetro que se desea recorrer, junto al sentido de corte deseado (4 opciones posibles). También se cuenta con otros parámetros no

accesibles por el usuario, como lo son la distancia entre puntos a generar y el overlap deseado en el corte.

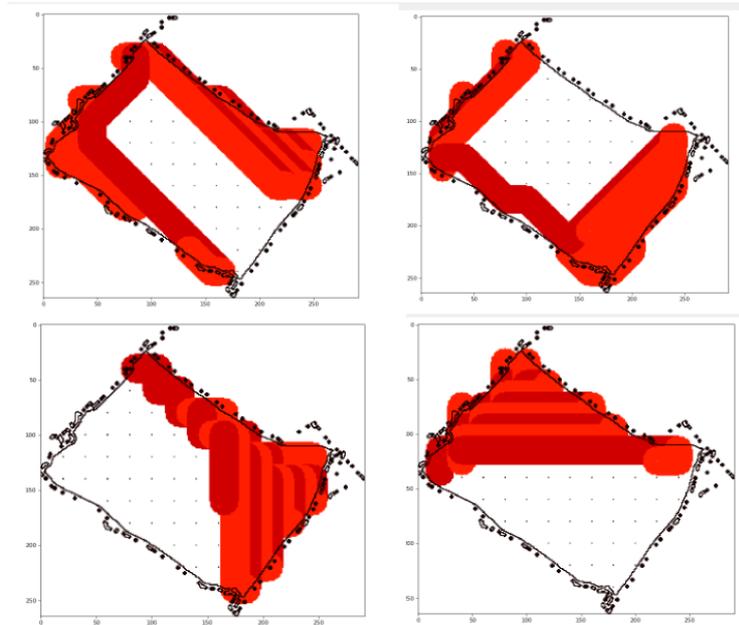


Figura 81 Representación de los distintos modos de corte seleccionables

Una vez recibida la lista de puntos que conforman el perímetro, se realiza un filtrado de los mismos, con el fin de reducir errores de alta frecuencia entre punto y punto. Luego se normalizan de modo que no haya puntos negativos, y se genera una imagen con escala 1px/cm.

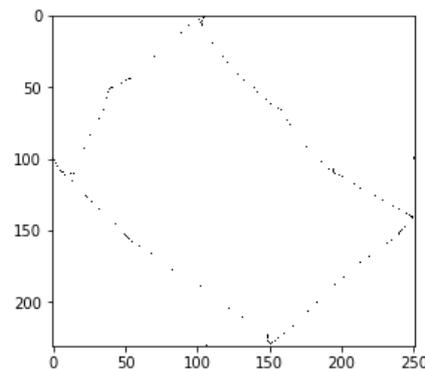


Figura 82 Imagen formada a partir de la normalización de los puntos del perímetro

Ya obtenida esta imagen, se trazan líneas entre puntos contiguos y se realiza un ensanchamiento mediante dilatación, obteniendo el siguiente resultado:

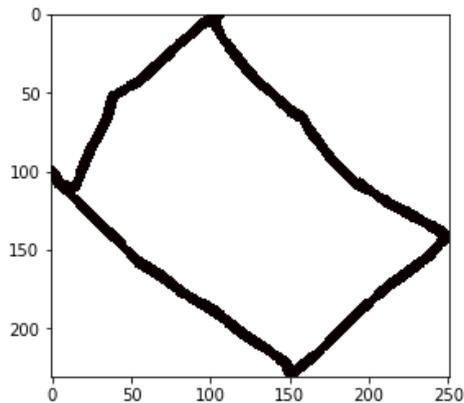


Figura 83 Perímetro obtenido luego de realizar la dilatación

Como se puede observar, en esta imagen el recorrido se encuentra más marcado, delimitando de manera más efectiva el área interior donde se desea trabajar. El próximo paso consiste en obtener este área, para lo cual se aprovecha el hecho de estar trabajando con imágenes, y se utiliza la función *fillConvexPoly* de la librería código abierto *openCV*. Esta función devuelve varias áreas cerradas detectadas en la imagen, para el caso de la figura anterior se obtienen 5, indicadas a continuación:

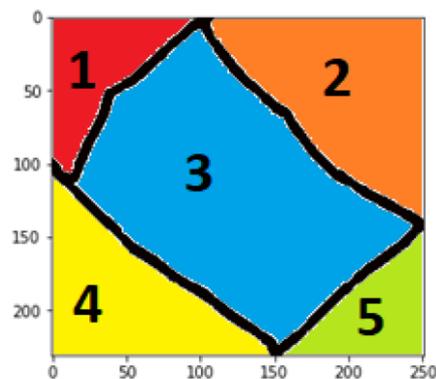


Figura 84 Áreas obtenidas al introducir el contorno en la función *fillConvexPoly*

Debido a que la imagen de entrada se obtiene normalizando los puntos del recorrido, es posible detectar el área de interés buscando la que tenga mayor rango de puntos en X y en Y. En este caso se pueden observar los siguientes valores:

Área	Rango X	Rango Y
1	115	107
2	123	143
3	238	236
4	149	118
5	100	98

Una vez identificada el área de interés, se genera una nueva imagen con la misma aislada.

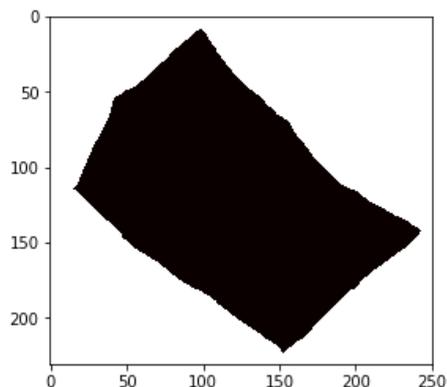


Figura 85 Área de interés aislada

Utilizando los parámetros de distancia entre puntos y *overlap* mencionados previamente, se genera una grilla de puntos dentro del área los cuales corresponden a cada punto que deberá visitar la cortadora de césped a la hora de realizar el proceso.

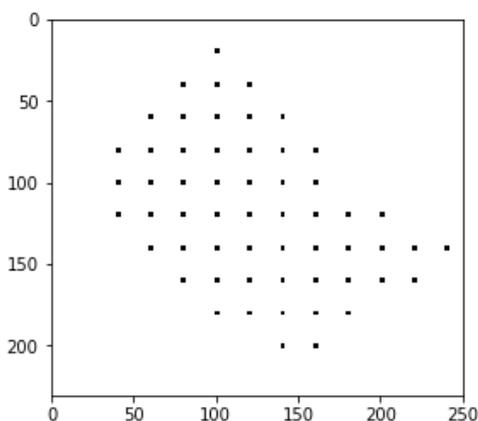


Figura 86 Grilla de puntos para el recorrido de la cortadora

Por último, es necesario indicar en que orden se deben visitar dichos puntos, lo cual depende del sentido de corte elegido por el usuario. Para esto se genera un grafo, generando vértices entre los puntos adyacentes, con un peso variable según el sentido de corte que se desee utilizar. De esta manera, ya se pueden generar dos tipos de cortes, uno que busca maximizar la cantidad de visitas a nodos adyacentes horizontales y verticales (cuyo peso relativo es w) y otro que busca maximizar la cantidad de visitas a nodos en diagonal (donde el peso relativo es $\sqrt{2}w$). Para generar los otros dos modos de corte, se rota la imagen 90° en sentido horario, provocando que se obtengan recorridos ortogonales a los generados anteriormente.

Una vez obtenido el recorrido seleccionado por el usuario, se desnormalizan los puntos, volviendo a formato posición, y se entrega al backend una lista ordenada con los puntos a visitar.

Para jardines de 10m x 10m, una distancia entre puntos de 20cm y un *overlap* de 50%, el algoritmo tarda menos de un segundo en ser ejecutado.

14.3.8.3.3. Orientación inicial absoluta

En todo momento, la orientación medida consiste en una medición relativa con respecto a un valor absoluto inicial definido. Sin embargo, dicha orientación no se puede obtener del MPU ya que el mismo mide velocidades angulares, y la posición angular se obtiene de manera indirecta tras realizar una integración. Por lo tanto, se diseñó un procedimiento de calibración para obtener una orientación absoluta inicial utilizando las mediciones del módulo posición.

Al tomar dos muestras de posición en dos intervalos de tiempo, es posible definir la orientación del equipo mediante trigonometría. Idealmente, con dos posiciones consecutivas en cualquier intervalo sería suficiente. Sin embargo, se debe considerar que las mediciones cuentan con errores de distribución y valores desconocidos.

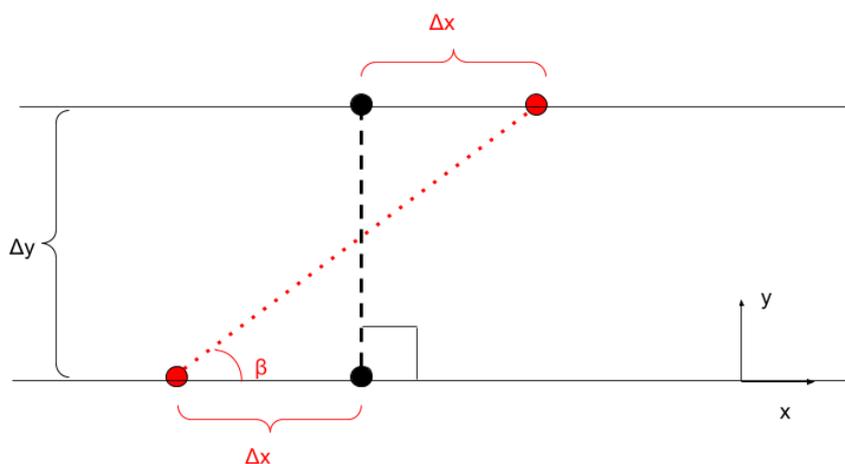


Figura 87 Variables para el cálculo de orientación absoluta

En la imagen se observa un ejemplo de medición indirecta de orientación a través de la posición. Se asumen los puntos negros como la posición real del equipo y los puntos rojos como la medida por el módulo posición, considerando un error Δx .

Con las mediciones de posición, se obtiene la orientación estimada β :

$$\beta = \text{tg}^{-1}(\Delta y / 2 * \Delta x)$$

En la ecuación se observa que si el error en la medición tiende a cero (caso ideal), la orientación tiende a 90° y coincide con la orientación real mostrada en el ejemplo. Para contar con un margen de error razonable, se decidió tomar una distribución uniforme de error con valores máximos de 5cm. Además, se tomó como definición que el error máximo admisible en la orientación inicial sea de 2° , para lo cual se necesita que $\Delta y \geq 300\text{cm}$.

Luego de realizar el análisis y obtener los parámetros necesarios para la calibración, se desarrolló el procedimiento para obtener la orientación inicial:

1. En un punto fijo, tomar la posición actual.
2. Avanzar en línea recta (de forma controlada) tres metros.
 - a. Si en algún momento el equipo se va del perímetro, se deben rotar 45° en sentido horario y reiniciar el proceso.
3. Recorridos los tres metros, frenar y medir la posición actual.
4. Calcular la orientación.
5. Dirigirse al punto inicial del recorrido e iniciar el mismo.

14.3.8.3.4. Sistema de navegación

Para el sistema de navegación se utilizó el concepto de programación orientada a objetos, permitiendo representar al robot (cortadora) y al control de navegación con objetos definidos como “*Robot*” y “*Nav*”. Además de una mayor facilidad para la programación y la interpretación, esto permite escalar el proyecto fácilmente agregando o modificando las características del objeto que se está controlando.

El objeto “*Robot*” cuenta con los parámetros:

- *Pos* (Posición actual)
- *Prev_pos* (Posición anterior)
- *Orient* (Orientación)
- *Speed* (Velocidad)

Por otro lado, el objeto “*Nav*” tiene los siguientes:

- *Target* (Próximo objetivo)
- *Rot_grades* (Grados a rotar)
- *Pos_error* (Error entre posición y objetivo)
- *Last_block* (Indica si se trata del último bloque de puntos del recorrido)

El objeto “*Nav*” toma los valores del objeto “*Robot*” para decidir las acciones a realizar, funcionando como el controlador del equipo. Por otro lado, los parámetros de “*Robot*” se actualizan de manera constante frente a los eventos generados en los distintos drivers para representar de la mejor manera posible el comportamiento del equipo en todo momento.

Utilizando los objetos descritos, la navegación consiste en recibir un bloque de puntos objetivos desde la web app y alcanzar de forma ordenada cada uno de ellos. El sistema registra que se alcanzó un punto si, al leer la posición de la cortadora, identifica que esta se encuentra dentro de un radio determinado del objetivo.

Alcanzado el objetivo, se pasa al siguiente punto, se reorienta para poder alcanzarlo y se avanza de forma controlada. Este proceso se repite para cada punto y, en caso de que sea el último, vuelve al punto de partida, finaliza el recorrido y vuelve al Modo Idle.

14.3.8.3.5. Control de posición y generación de “paredes”

Idealmente, la medición de orientación se realizará correctamente, el control de orientación generará un movimiento en línea recta y el equipo irá alcanzando cada objetivo sin inconvenientes. Sin embargo, cualquier error que genere que la cortadora de césped se desvíe provocará que siga

avanzando indefinidamente, debido a no poder alcanzar el objetivo. Por este motivo, se diseñó un control de posición para restringir los movimientos del equipo en casos de errores inesperados, generando lo que se denomina como “paredes de contención”.

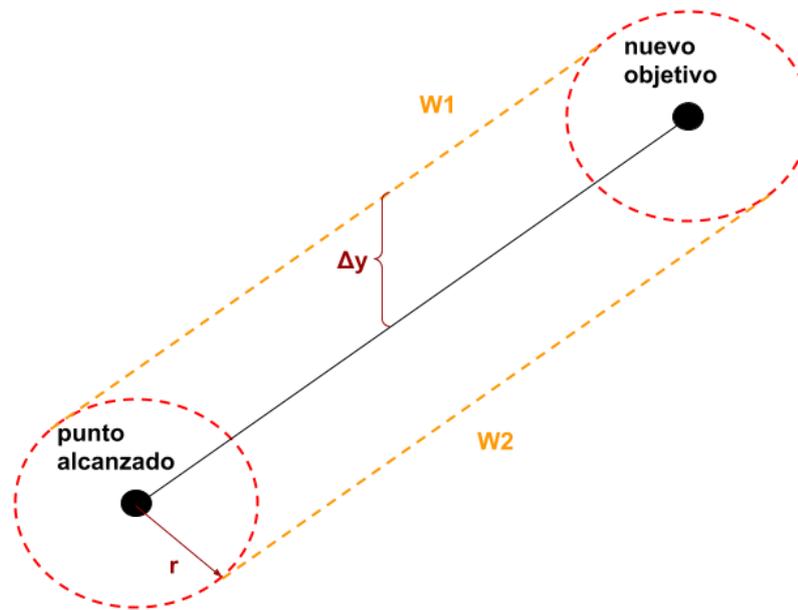


Figura 88 Paredes de contención

Se plantean rectas entre el punto alcanzado y el próximo objetivo. Con las posiciones de ambos puntos se obtiene la distancia entre ellos y la inclinación de la recta con respecto al eje x , permitiendo obtener los valores de pendiente y ordenada al origen cumpliendo con la ecuación lineal $y = ax + b$.

La lógica del control es la siguiente:

1. El sistema registra que el equipo alcanza un punto al ingresar a una circunferencia de radio r centrada en el mismo.
2. Se toma el siguiente objetivo y con ese valor y el punto recién alcanzado se calcula la pendiente y ordenada al origen de la recta que une ambos puntos.
3. Se calcula el error admisible Δy a partir del radio r .
4. El equipo parte hacia el nuevo objetivo, midiendo la posición en intervalos de 500ms.
5. Se toma el valor de la coordenada “ x ” de la posición medida y se evalúa en la ecuación de la recta calculada, obteniendo el valor esperado de la coordenada “ y ” denominado y_e . Se compara el resultado con el valor real de la coordenada “ y ” de la posición medida y_m y se procede según el resultado:
 - a. Si se cumple que $y_m > (y_e + \Delta y)$ o bien $y_m < (y_e - \Delta y)$, quiere decir que la cortadora tiene un error superior al admisible, y por lo tanto debe frenar, reorientarse y volver a dirigirse al objetivo.
 - b. Si no se cumple lo planteado en el punto anterior, quiere decir que la cortadora se encuentra dentro de los límites establecidos y no se debe alterar la trayectoria actual.

Implementar efectivamente el control desarrollado implica que el equipo se mantendrá siempre entre los límites de las líneas **W1** y **W2**, denominadas “paredes” en el desarrollo del algoritmo.

14.3.8.3.6. Principales funciones

El Modo Autónomo cuenta con diversas funciones que permiten el desarrollo del programa. A continuación, se describen las principales.

Nombre	Aut_get_tgt_degrees()
Descripción	Evalúa la orientación actual y la necesaria para estar orientado hacia el nuevo objetivo. Calcula la diferencia entre ambas y el sentido de giro para rotar los grados calculados.
Parámetros de entrada	Ninguno, ya que utiliza los parámetros de los objetos globales del módulo.
Salida	Variable de tipo “int” que indica los grados a rotar y, dependiendo del signo, el sentido de rotación.

Figura 89 Detalle de función Aut_get_tgt_degrees

Nombre	Aut_update_pos()
Descripción	Lee la posición y la orientación de los drivers correspondientes, las publica en la web app y evalúa que la posición se encuentre dentro de los límites de W1 y W2.
Parámetros de entrada	Ninguno, ya que utiliza los parámetros de los objetos globales del módulo.
Salida	Ninguna

Figura 90 Detalle de función Aut_update_pos

Nombre	Aut_build_wall()
Descripción	Genera la recta entre el punto alcanzado y el nuevo objetivo para lograr limitar el recorrido entre las “paredes” W1 y W2.
Parámetros de entrada	Ninguno, ya que utiliza los parámetros de los objetos globales del módulo.
Salida	Ninguno, carga los valores para el control en el objeto “Nav”.

Figura 91 Detalle de función Aut_build_wall

Nombre	Aut_predict_orient()
Descripción	Evalúa la orientación actual y la necesaria para orientarse al nuevo objetivo. Calcula si se puede ajustar la referencia utilizando el control de orientación o si debe frenar y reorientar, mientras sigue en movimiento.
Parámetros de entrada	Ninguno, ya que utiliza los parámetros de los objetos globales del módulo.
Salida	Variable de tipo bool: <ul style="list-style-type: none"> • True: Indica que no es necesario frenar y debe únicamente cambiar la referencia de orientación. • False: Indica que debe frenar para rotar y reorientar.

14.3.9. Software del módulo objetos

14.3.9.1. Programación de microcontroladores

Durante el funcionamiento del modo autónomo el módulo de detección de objetos debe contemplar las siguientes funciones para que sea posible evadir obstáculos correctamente:

- Lectura de los fin de carrera
- Manejo de los selectores del multiplexor para obtener el valor de cada sensor IR
- Establecer una comunicación y transferir la información necesaria al módulo central

Dada la velocidad de la lectura de los puertos de entrada de los fin de carreras y la selección de los distintos sensores IR, se optó por realizar una lectura de todos los sensores antes de verificar si hubo una detección de un objeto. Si esto sucede, se envían todos estos datos al módulo central para informar al algoritmo cada detección. A continuación, se podrá ver el diagrama de flujo del software del microcontrolador de detección de objetos:

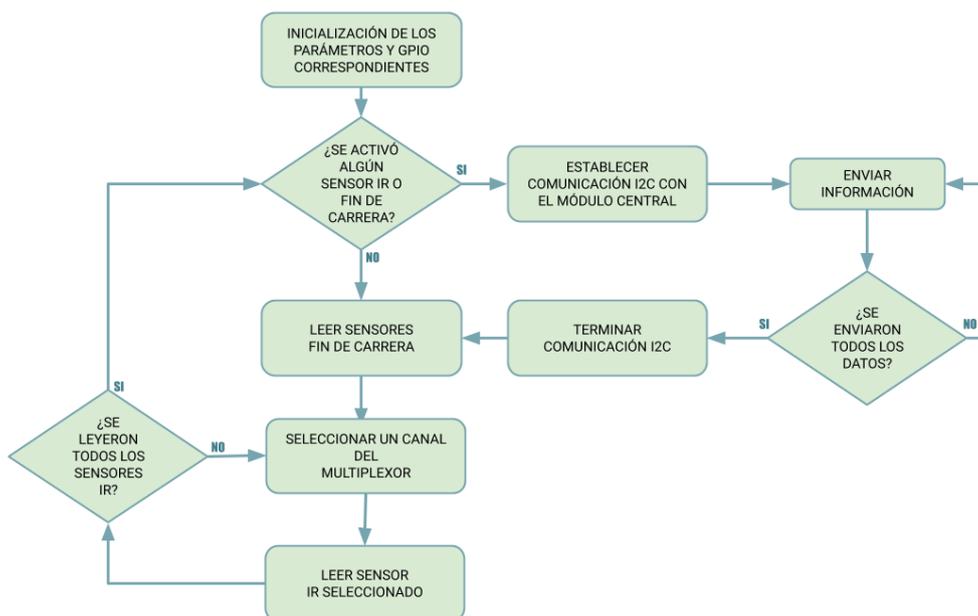


Figura 93 Diagrama en bloques del software de detección de objetos

14.3.9.2. Transferencia de datos al módulo central

En el momento que se detecta que hubo un cambio en los datos leídos de los sensores IR o fin de carrera esta información se transmite mediante el protocolo I2C al módulo central. A continuación, se puede ver un ejemplo del paquete de datos enviados correspondiente a los 19 sensores. La posición donde se ubica el dato en el arreglo corresponde a la ubicación horaria de los sensores. De esta manera se reduce la cantidad de información que se debe transferir y el tiempo de transmisión. Cada dato de los sensores está compuesto por un byte cuyo valor puede ser 0 o 1.

IR	ES	ES	ES															
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	01	02	03

Figura 94 Esquema representativo de los datos que se transmiten por I2C

14.3.10. Conectividad y control del dispositivo mediante la Web App

14.3.10.1. Conectividad entre sistemas

Para la conectividad y transferencia de datos entre el dispositivo y la aplicación se optó por usar el protocolo MQTT; ya que está diseñado para aplicaciones IoT, es un protocolo estándar, y es eficiente para aplicaciones de bajo consumo por ser lightweight (tiene menor *overhead* por lo cual es menor la cantidad de datos a transmitir).

Para que el sistema funcione correctamente se dispone de:

- Dispositivo IoT con conectividad wifi con su correspondiente código
- MQTT Broker IoT
- Web app con su correspondiente backend, base de datos y frontend

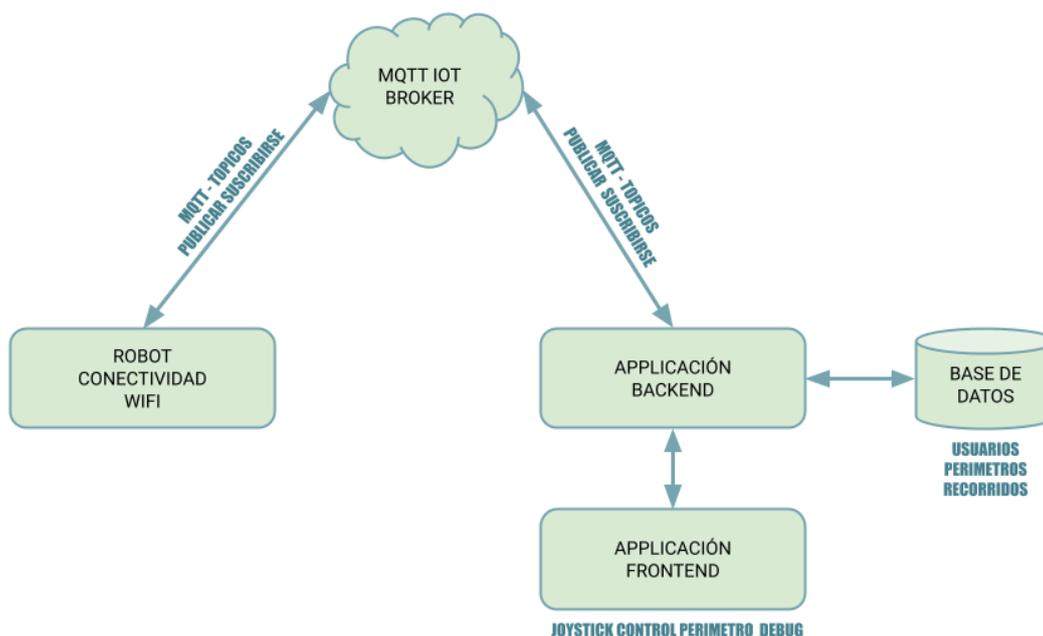


Figura 95 Diagrama en bloques del software de la conectividad entre sistemas

14.3.10.2. MQTT Broker IoT

14.3.10.2.1. Uso del protocolo MQTT

Para el diseño de este proyecto se optó por tercerizar el servicio del MQTT Broker ya que varias empresas como, por ejemplo, Amazon, Microsoft, IBM y Google brindan el servicio junto a toda la infraestructura asociada, reduciendo el tiempo de desarrollo y el costo inicial. Para el prototipo se utilizará IBM Watson IoT cuya configuración requiere registrar los dispositivos utilizados. En este diseño se registran dos dispositivos para cada usuario siendo estos la cortadora y la aplicación que la controla. Al registrar los dispositivos se generan llaves y tokens de autenticación que serán utilizados para que los dispositivos validen su identidad ante el broker.

Para la comunicación entre los dispositivos se definen los siguientes tópicos:

- "GPS": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/gps/fmt/json",
- "DEBUG": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/debug/fmt/json",
- "ERROR": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/error/fmt/json",
- "CONNECTION": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/connection/fmt/json",

- "MOVEMENT": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/movement/fmt/json",
- "MODE": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/mode/fmt/json",
- "ORIENTATION": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/orientation/fmt/json",
- "AUTONOMOUS": "iot-2/type/cadpgk/id/robot01/evt/autonomous/fmt/json"

En el caso de que haya una nueva coordenada del módulo posición que deba ser transmitida a la aplicación será publicada en el tópico "GPS". En el caso de que se ejecute un comando en la web app que corresponda al movimiento de la cortadora, como por ejemplo avanzar hacia adelante, esta información será publicada en el tópico "MOVEMENT". Esto se repite para cada uno de los tópicos listados previamente.

El protocolo cuenta con un mecanismo de calidad de servicio (QoS) con la utilidad de agregar un grado de robustez ante fallas. Este mecanismo cuenta con tres niveles de QoS posibles, y para este diseño se utilizará QoS 1. Este nivel de servicio garantiza que el mensaje se entregará al menos una vez y de esta manera se evitará que se pierda información. No se considera el QoS 2 porque agrega un *overhead* innecesario para este tipo de aplicación. Cabe destacar que al utilizar QoS 1 los datos pueden ser enviados más de una vez, factor que deberá ser considerado en el diseño de los algoritmos.

14.3.10.3. Cortadora de césped como dispositivo IoT

Una vez establecida la conexión, el dispositivo se suscribe a determinados tópicos donde recibirá información o comandos provenientes de la web app. En caso de que se pierda la conexión (wifi o MQTT) la cortadora la restablecerá automáticamente.

Cuando la cortadora esté en modo autónomo transmitirá su posición actual y solicitará información sobre el recorrido que debe realizar de a bloques. Ya que el cálculo y el almacenamiento de todo el recorrido dentro del perímetro requiere memoria y tiempo de cómputo, se optó que los algoritmos correspondientes se hagan en la nube. Una vez calculados los recorridos, según el tipo de corte que el usuario seleccione, se dará inicio al proceso de corte e intercambio de información entre la nube y la cortadora.

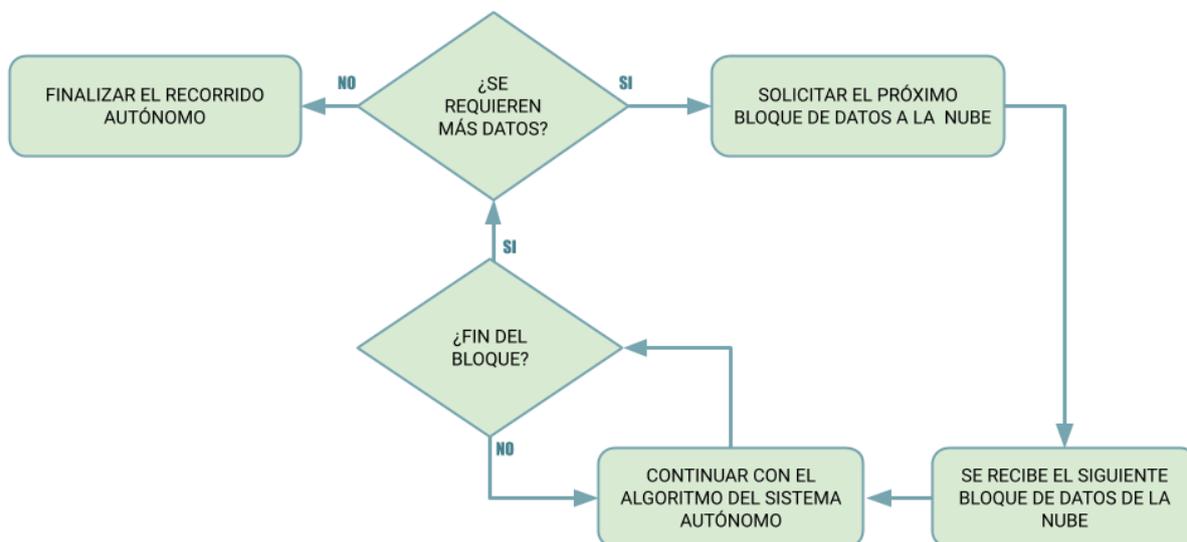


Figura 96 Diagrama en bloques del software de la solicitud de datos del recorrido autónomo

Todo el recorrido a realizar se subdivide en distintos bloques de datos para que se ajusten a la memoria disponible en la cortadora, los cuales serán transmitidos a medida que esta los necesite. El último bloque de la cadena tendrá el último dato repetido, es decir, el resto de los espacios disponibles del bloque se completan con este dato. La cortadora y la web app tendrán un registro de la cantidad de bloques transmitidos y recibidos.

Cada coordenada enviada en los bloques consiste en dos valores, latitud y longitud. El formato de cada valor es de 2 bytes no signado. La estructura de los bloques consiste en coordenadas sin delimitadores, como se puede apreciar en la Tabla 63. La cortadora podrá procesar esta información tomando 4 bytes contiguos como una coordenada. El último valor del bloque será interpretado como terminador. Este tendrá valores de 65535 en el caso de que sea el último bloque o 65534 si todavía hay bloques disponibles para recibir.

Coordenada 0		Coordenada 1		Coordenada...	Terminador	
2 bytes X	2 bytes Y	2 bytes X	2 bytes Y	...	65534 o 65535	65534 o 65535

Tabla 63 Ejemplificación de los bloques transmitidos

Cuando se recibe un paquete desde la web app se ejecuta una subrutina donde se trata esta información. En el caso de querer publicar algún dato, se ejecuta una subrutina que se encarga de hacer todas las operaciones necesarias. Una descripción breve del conjunto de subrutinas más usadas en la conectividad entre el dispositivo IoT y la web app es la siguiente:

Conjunto de subrutinas	Descripción
------------------------	-------------

<p>WIFI_connect MQTT_setup WIFIMQTT_loop</p>	<p>Configuración e inicialización para establecer una conexión con la red y el servidor del broker.</p> <p>La configuración y utilización de las credenciales de la red wifi o las credenciales de autenticación para el dispositivo IoT con el broker se encuentran en estas subrutinas.</p> <p>Manejo de subrutinas esenciales para wifi y MQTT.</p>
<p>MQTT_publishCoordinate MQTT_publishOrientacion MQTT_publishObjects MQTT_publishTheError MQTT_publishConnectionOnline MQTT_publishDebug</p>	<p>Subrutinas que publican información a los tópicos correspondientes de las distintas variables de la cortadora, como por ejemplo posición, orientación, o errores.</p>
<p>MQTT_requestAutonomousBlock MQTT_autonomousBlockAvailable</p>	<p>Específicas al intercambio de bloques de datos para realizar el recorrido autónomo.</p>
<p>MQTT_newMessageReceived MQTT_setNewMessage MQTT_getCurrentMessage</p>	<p>Subrutinas dedicadas al manejo de información para utilizar como input en el sistema manual, selección de modos y algunos detalles del modo autónomo.</p>

Tabla 64 Subrutinas de la conectividad entre la web app y el robot

Las principales librerías utilizadas para la conectividad son las siguientes:

- SDK ESP32 de ESPRESSIF
- PubSubClient para ESP32

El SDK ESP32 de ESPRESSIF brinda las funciones y módulos necesarios para establecer y mantener una conexión wifi. La documentación del SDK ESP32⁵ detalla varios ejemplos y sugerencias para tener en cuenta sobre la aplicación WIFI. PubSubClient es una librería para el manejo de un cliente MQTT bajo la licencia MIT.

14.3.10.4. Desarrollo de la web app

La web app se desarrollará con Node JS y React, frameworks de Javascript open source y multiplataforma. Dada su versatilidad, es posible desarrollar la aplicación de forma compacta y modular para migrar de un servidor o servicio tercerizado.

En el frontend de la aplicación el usuario podrá controlar la cortadora con botones, visualizar en tiempo real el recorrido que está haciendo, visualizar un sistema de notificaciones para tener un recordatorio de cuándo se debe hacer un corte, leer información relevante del dispositivo y por último

⁵ [Sugerencias y documentación del SDK ESP32](#)

seleccionar, crear, eliminar y almacenar distintos perímetros. En el caso de que se quiera ver el estado actual del funcionamiento de la cortadora, se contará con un panel de debug para poder visualizarlo.

El backend de la aplicación maneja la información correspondiente al protocolo MQTT, ya sean los comandos publicados, los tópicos a los que esta suscripta la cortadora, los datos que se deben manejar entre la aplicación y la base datos (como por ejemplo los perímetros almacenados), el recorrido autónomo calculado que debe hacer la cortadora, y las credenciales para la autenticación de usuarios.

Toda la información almacenada estará en una base de datos no relacional llamada MongoDB. Los datos almacenados de cada usuario son:

- Usuario, email y contraseña
- API Key y token de su cortadora y la aplicación
- Perímetros almacenados
- Recorridos autónomos previamente calculados para cada uno de los perímetros
- Registro de notificaciones
- Fecha del último corte realizado

La web app desarrollada tendrá una interfaz donde el usuario podrá ver en tiempo real la traza del recorrido realizado junto al perímetro marcado.

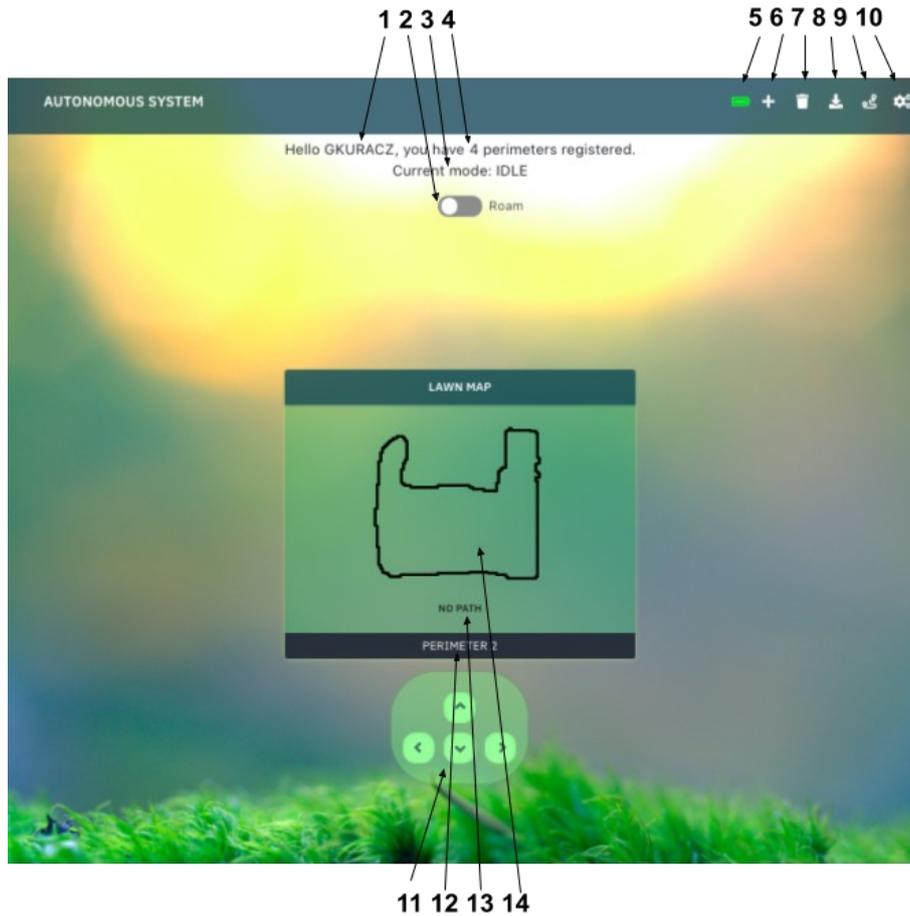
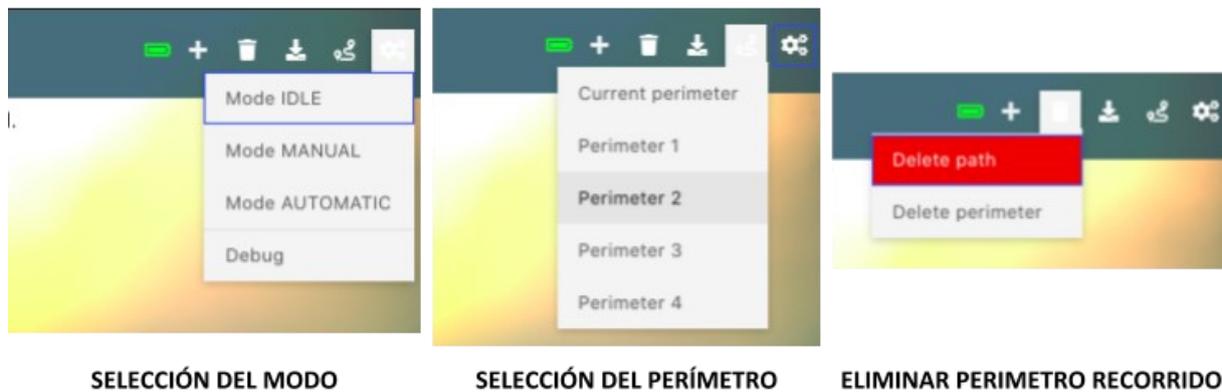


Figura 97 Web app desarrollada y marcas de las características principales

1. Nombre del usuario que está utilizando la aplicación.
2. Botón para habilitar y deshabilitar el inicio de la traza del robot. Estos datos se usan para delimitar el perímetro.
3. Leyenda que muestra el modo actual en que está la cortadora.
4. La cantidad de perímetros que están asociados y almacenados en la base de datos.
5. El estado actual de la batería de la cortadora.
6. Botón para agregar un perímetro nuevo.
7. Botón para eliminar el perímetro o recorrido de la base de datos
8. Botón para guardar en la base de datos el perímetro seleccionado.
9. Botón para elegir qué perímetro se quiere utilizar de los disponibles.
10. Botón para seleccionar el modo o debug.
11. Joystick para controlar la cortadora.
12. Leyenda de que perímetro está seleccionado.
13. Leyenda de alerta cuando no hay perímetro o traza seleccionada.
14. Área donde se visualiza en tiempo real el perímetro seleccionado y el recorrido.



SELECCIÓN DEL MODO

SELECCIÓN DEL PERÍMETRO

ELIMINAR PERIMETRO RECORRIDO

Figura 98 Detalles de la web App desarrollada

Se debe destacar que la presencia de un control para la cortadora en modo manual es necesaria para el requerimiento INT-DAT-02.

15. Construcción del Prototipo

15.1. Prototipo a escala

Se construyó un prototipo a escala de manera tal de poder validar la mayor cantidad de especificaciones sin necesitar equipamiento especializado ni acceso a laboratorios de electrónica o talleres de mecánica. Esto se debe a que la implementación del prototipo ocurrió durante la pandemia de COVID-19, y los laboratorios y servicios de mecanizado no se encontraban disponibles.



Figura 99 Prototipo a escala

15.2. Dimensiones y peso

Se fabricó un chasis de madera para obtener una superficie liviana y rígida que a su vez pueda ser trabajada con las herramientas disponibles. Este tiene la misma forma que el del producto final, pero con las siguientes dimensiones:

- Largo: 25cm
- Ancho: 20cm
- Espesor: 5mm

Al ser de madera, el prototipo no podrá usar el chasis como plano de masa para la antena de GPS como en el producto final. Para solucionar el problema, se colocaron tres varillas roscadas para soportar una superficie de aluminio 8 cm sobre el chasis y utilizarla como plano de masa para la antena.

Considerando la estructura completa, los motores y todos los componentes electrónicos se obtiene un peso del prototipo de 0,97Kg.

15.3. Alimentación y potencia

Para alimentar el prototipo se utilizó una batería de litio recargable con las siguientes características:

- Capacidad: 5000mAh
- Entrada y dos salidas por USB
- Tensión de salida: 5V
- Corriente máxima de salida: 2,1A
- Medidas: 9cm x 6cm x 1cm
- Peso: 103g

Para controlar los motores se utilizó un integrado L298N, que consiste en un circuito puente H con un regulador de 5V incorporado. Finalmente, se colocaron tres capacitores electrolíticos (dos de 1uF y uno de 0,1uF) para entregar la corriente de arranque necesaria a los motores. La etapa de alimentación y potencia se implementó dentro del Módulo Central del prototipo. El esquemático se observa en la Figura 118 Módulo Central implementado en el prototipo (se utilizó la placa de desarrollo Nodemcu ESP32, por lo cual se representa a través de su pinout) ubicada en el anexo.

15.4. Sensores y microcontroladores

Los sensores utilizados serán los siguientes:

- Arreglo de infrarrojos
- Arreglo de fin de carrera
- Receptor GNSS u-blox NEO M8T
- IMU MPU6050

Se utilizaron dos microcontroladores para aumentar la eficiencia en relación a la velocidad de procesamiento.

1. Módulo Central: Además de ejecutar el programa principal, lleva a cabo el control de los motores, de la IMU y la comunicación vía wifi con el servidor de la web app. Se comunica con el módulo de detección de objetos por I2C, con el módulo GNSS mediante el protocolo UART, y con la base mediante wifi. Se utilizó un microcontrolador ESP32. El esquemático de este módulo se observa en la Figura 118 Módulo Central implementado en el prototipo (se utilizó la placa de desarrollo Nodemcu ESP32, por lo cual se representa a través de su pinout) del anexo.
2. Módulo de detección de objetos: Controla un multiplexor para obtener información de los sensores infrarrojos y recibe el sensado de los fines de carrera. Procesa dicha información y la envía al módulo central utilizando el protocolo I2C. Se utilizó un Arduino Nano dada la baja capacidad de procesamiento necesaria para este módulo.

15.4.1. Sensores de detección de objetos

El prototipo a escala cuenta con 16 sensores infrarrojos y tres fines de carrera que cumplen con la misma funcionalidad del producto final. La distribución y colocación de ellos está detallada en la sección 14.2.6. Los detalles y características más relevantes de los sensores se aclaran a continuación:

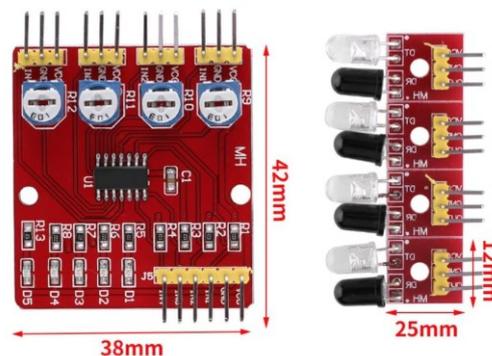


Figura 100 Módulos infrarrojos del prototipo.

- Tensión de operación: 3V - 6V
- Distancia de detección: 0.1cm a 60cm
- Angulo de detección: 35°
- Cantidad de canales: 4

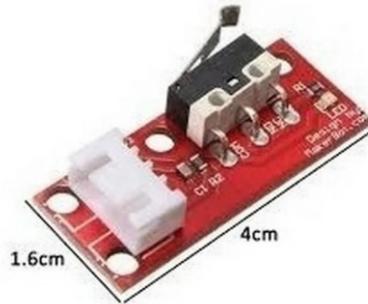


Figura 101 Módulos fin de carrera del prototipo

- Tensión de operación: 5V

15.5. Motores

Al tratarse de un prototipo a escala, el motor de corte utilizado tiene una función representativa únicamente, ya que no podrá cortar el césped. De lo contrario, el peso y el consumo del motor necesario imposibilitarían la implementación de este prototipo.

Para simular el corte, se colocó un pequeño motor de corriente continua con una hélice de plástico. Este se puede observar en la parte frontal del plano de masa con la hélice hacia arriba, para visualizar de mejor forma su control. El comportamiento del motor será idéntico al caso del producto final.

Para el desplazamiento, se utilizaron dos motorreductores TT130. Estos tienen las siguientes características, suficientes para generar el movimiento necesario del prototipo:

- Tensión de operación: 3V a 6V
- Torque de arranque: 2,7 Kg*cm
- Corriente de arranque: 1,25 A
- Velocidad nominal: 50 rpm



Figura 102 Motores del prototipo

16. Validación del Prototipo

16.1. Simulación de recorrido simple

Esta simulación corresponde a la prueba S-AUT-02 del plan de validación. Se les asignaron errores a las variables de posición, orientación y control de giros. Asignados estos errores, se inició la simulación y se reportó la posición de la cortadora cada 500ms. El resultado fue el siguiente:

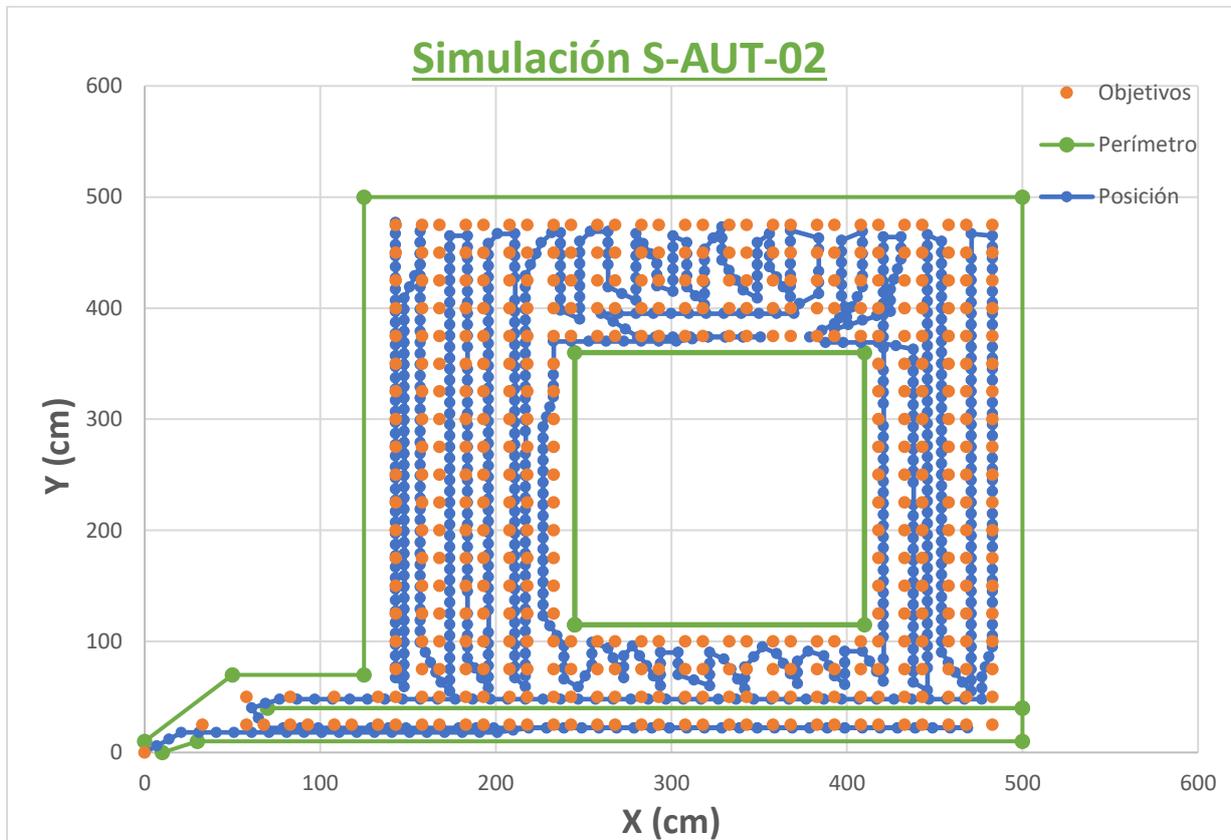


Figura 103 Simulación S-AUT-02

Las líneas azules representan el recorrido del equipo y los puntos del mismo color los momentos en los cuales se realizó la medición de posición. Se debe tener en consideración que el equipo en la simulación se representa como un punto, mientras que en la realidad cuenta con una tanza de 30cm de diámetro. Es decir, si un punto azul se acerca a 15cm o menos de un punto naranja (objetivo), se considera que fue alcanzado ya que el césped en ese objetivo estaría cortado.

Para analizar los errores, se compararon los objetivos con las posiciones de la cortadora que se encuentran más cerca a cada uno. Realizada la comparación para cada uno de los 400 objetivos definidos, se obtuvieron los siguientes valores:

- Error medio: $\varepsilon_{medio} = 6,78cm$
- Error máximo: $\varepsilon_{máximo} = 15cm$

En el gráfico se observa que todos los objetivos fueron alcanzados a una distancia igual o menor a 15cm y que el recorrido fue realizado completo y sin salir del perímetro marcado en color verde. Se verifica que $\varepsilon_{m\acute{a}ximo} \leq 15cm$ y, por lo tanto, se alcanzaron los criterios para completar la validación.

16.1.1. Simulación de evasión de objetos

Se realizó la simulación S-OBJ-01, en donde se imitó la respuesta de los sensores en base a la proximidad del equipo y su orientación con respecto al elemento a esquivar. Para simplificar la programación, se tomaron todos objetos cuadrados.

Dado que el objetivo de esta simulación es evaluar la capacidad de evasión de objetos, se tomó un recorrido más acotado que en el resto de las simulaciones. Para agregar un grado mayor de dificultad, se colocó el objeto sobre el perímetro, de manera tal de evaluar si la evasión se realiza sin salir de los límites marcados.

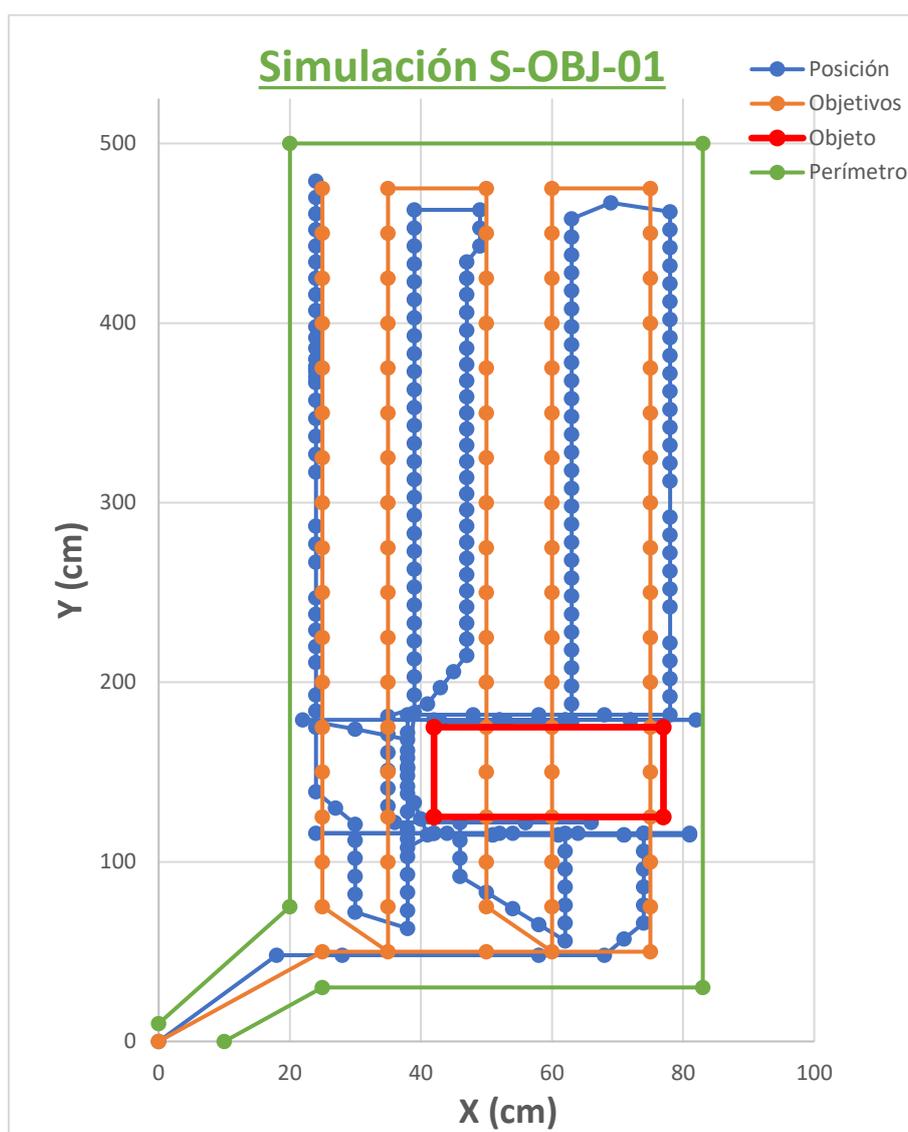


Figura 104 Simulación S-OBJ-01

En azul se muestra cómo la cortadora realiza el recorrido alcanzando cada objetivo esquivando el objeto marcado en color rojo. Dado que hay objetivos dentro del objeto a una distancia mayor al borde a los 15cm de error tolerados, luego de bordear el obstáculo el sistema de navegación considera inalcanzable al objetivo y lo descarta, pasando al siguiente. Se observa también que, sobre el margen derecho del perímetro, el equipo se frena, rota 180 grados y procede a esquivar al objeto en el otro sentido ya que de lo contrario saldría del área marcada. Por ambos motivos, se consideran alcanzados los criterios de la validación y se concluye que se realizó correctamente.

16.1.2. Simulación híbrida

Estas simulaciones consistieron en la integración del prototipo con la medición de orientación y los motores funcionando, tomando todas las consideraciones generales que se indican en la validación S-HIB-01.

Se ubicó el prototipo en un espacio controlado para que rote sobre su centro de masa, simulando avances y cambios en su posición. De esta forma se puede simular un proceso de corte con los errores de giro y medición de orientación más aproximados a la realidad. El resultado de la simulación se muestra a continuación.

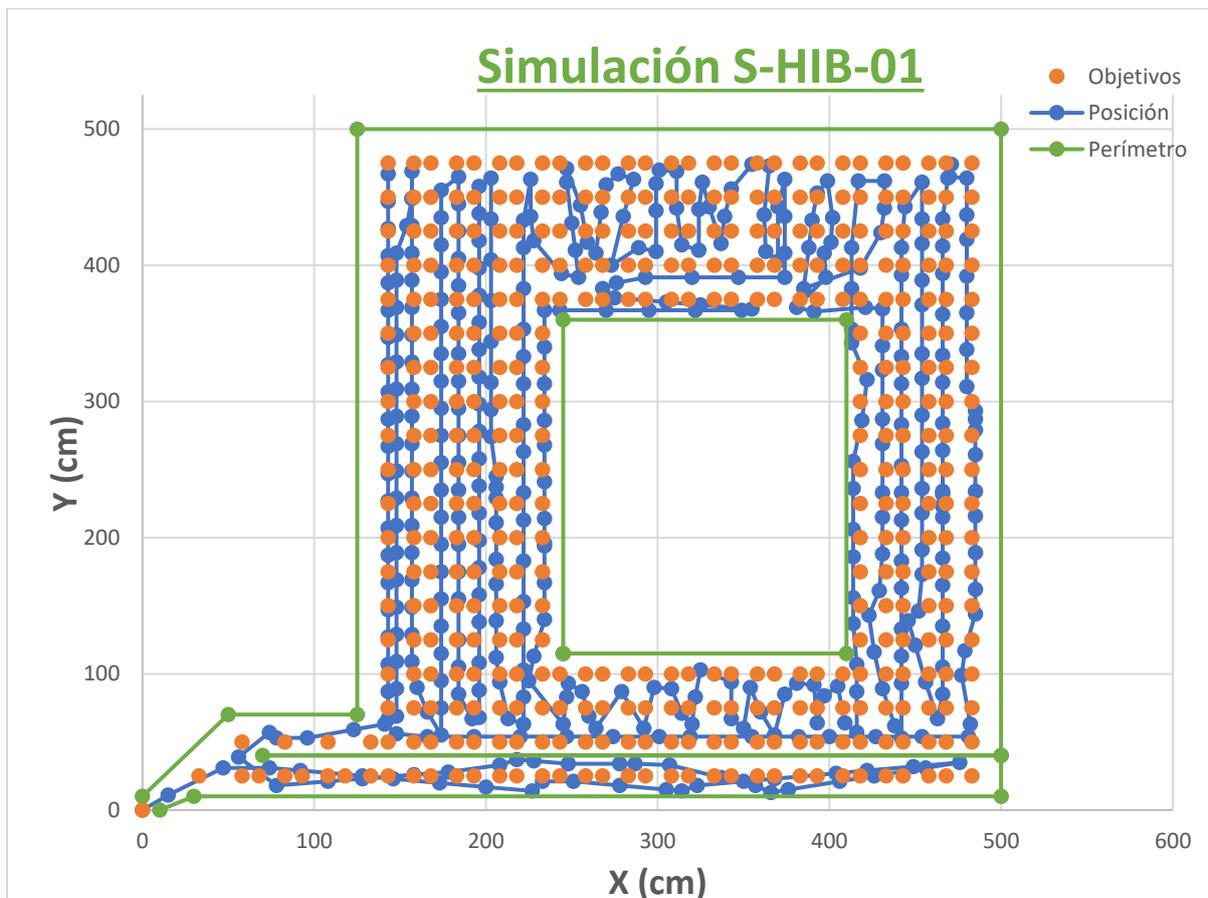


Figura 105 Simulación S-HIB-01

El análisis de los resultados es análogo al descrito para la simulación S-AUT-02. Se obtuvieron los siguientes valores:

- Error medio: $\varepsilon_{medio} = 5,21cm$
- Error máximo: $\varepsilon_{máximo} = 14cm$

El recorrido se realiza correctamente, no se sale del perímetro delimitado y se obtiene que $\varepsilon_{máximo} = 14cm \leq 15cm$. Por lo tanto, se concluye que la simulación fue exitosa.

16.2. Validaciones de especificaciones

16.2.1. Conectividad con la web app y wifi

Al comienzo de todas las pruebas realizadas con el prototipo, se valida la capacidad del equipo de conectarse a la web app, transmitiendo y recibiendo mensajes de la misma, realizando las pruebas de validación T-COM-01 y T-COM-02, y comprobando mediante inspección visual que efectivamente la web app reporta los datos enviados por la cortadora y la cortadora responde ante los comandos enviados desde la web app.

Se validaron las siguientes especificaciones:

FUN-APP-01	El producto debe estar vinculado con una aplicación o web app disponible en el celular o dispositivo móvil del usuario.
INT-AMB-02	El dispositivo deberá poder conectarse a una red wifi 802.11 b/g/n.

16.2.2. Precisión en el posicionamiento

Para validar la precisión en la medición de posición, se llevó a cabo la prueba T-AUT-02. Esta se repitió 10 veces y se obtuvieron resultados similares. Se muestran a continuación los resultados de una repetición de la serie:

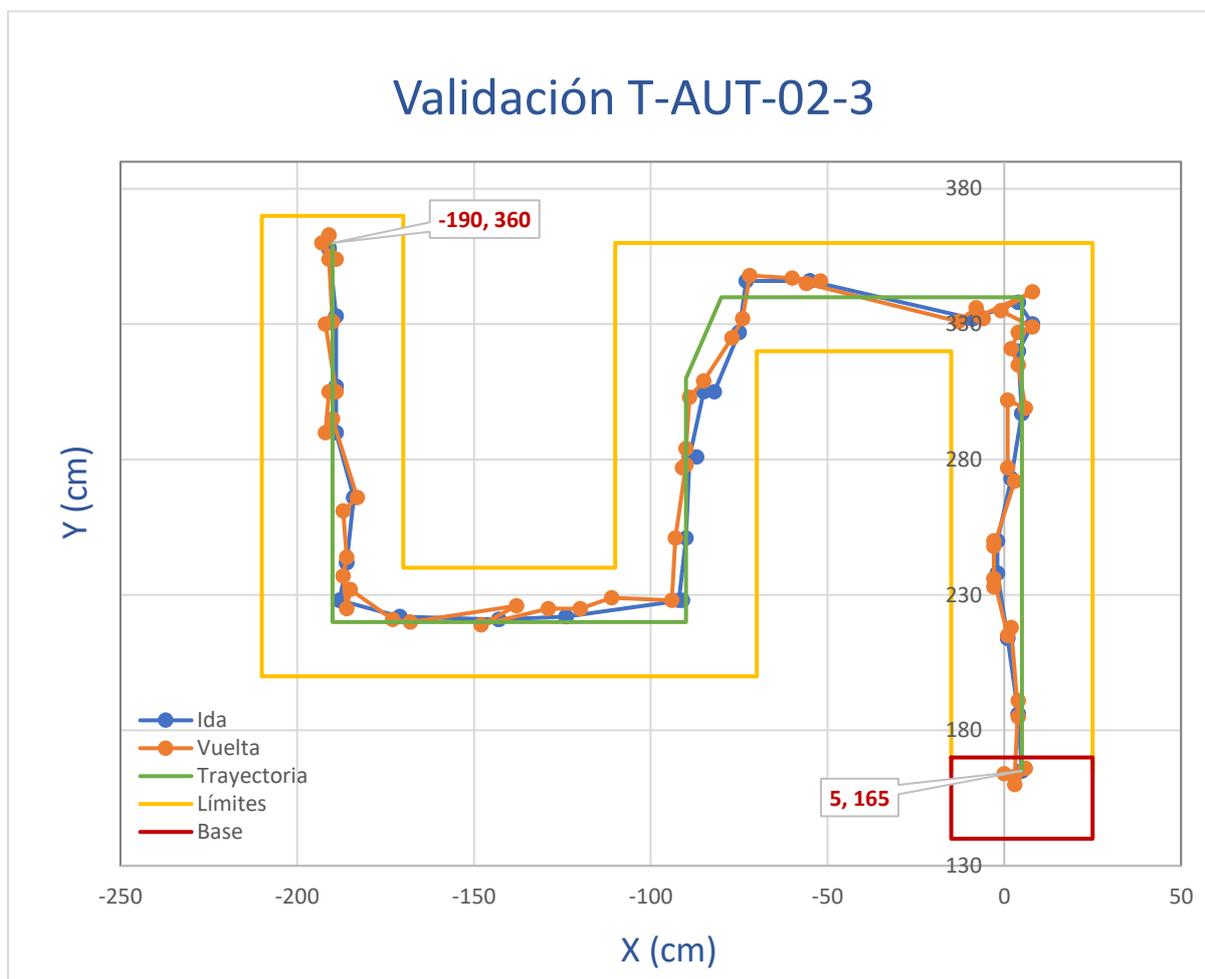


Figura 106 Validación T-AUT-02-3

En color verde se observa la trayectoria definida para realizar la prueba. Se buscó alinear el banco de pruebas con el Norte (eje Y) para que la trayectoria sea observable fácilmente. Se definieron los parámetros necesarios para comenzar la prueba:

- Inicio y fin (sobre la base): $X = 5\text{cm}$; $Y = 165\text{cm}$
- Extremo de la trayectoria: $X = -190\text{cm}$; $Y = 360\text{cm}$
- Error admisible: 20cm con respecto a la trayectoria definida
- Tasa de muestreo de posición: 2Hz

Se diferenciaron la ida y la vuelta para una mejor interpretación. La ida se muestra en color azul y en color naranja la vuelta, pudiendo verificar que en ambos sentidos el recorrido se produce de igual forma y con errores similares.

Obtenidos los valores de posición tanto para la ida como para la vuelta, se calculó el error en cada medición con respecto a la trayectoria definida. Los resultados obtenidos se graficaron en la siguiente imagen para los 62 segundos que tardó el dispositivo en realizar el recorrido.

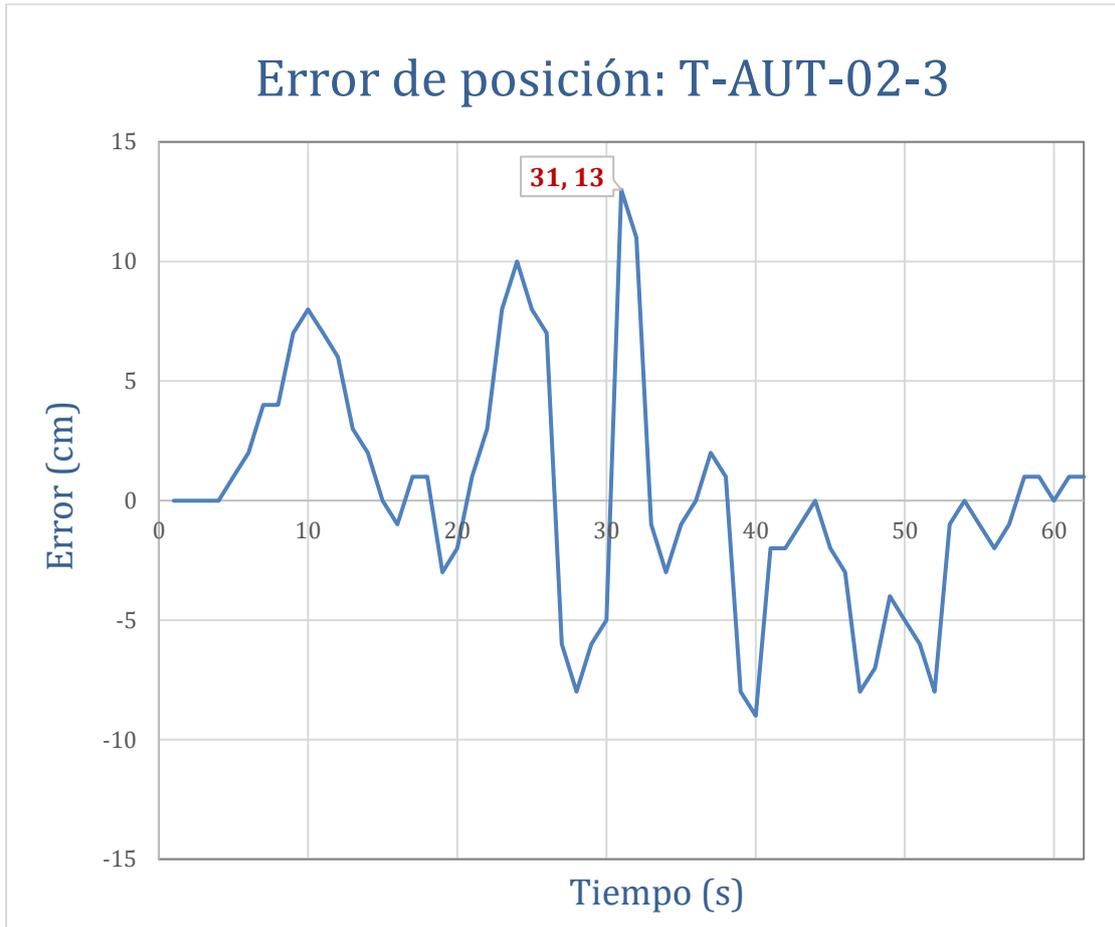


Figura 107 Error de posición en T-AUT-02-3

Se observa que el pico ocurre a los 31 segundos, resultando para esta repetición $\epsilon_{m\acute{a}ximo} = 13cm$.

El resto de las repeticiones se analizaron de igual forma, y se obtuvieron los errores máximos:

Repetici3n	$\epsilon_{m\acute{a}ximo}(cm)$
1	11
2	-10
3	13
4	13
5	12
6	13
7	-11
8	12
9	-13
10	-11

Tabla 65 Errores en cada repetic3n

Considerando todas las repeticiones de la serie, se obtienen los siguientes valores:

- Error promedio: $\epsilon_{medio} = 11,9cm$
- Error máximo: $\epsilon_{m\acute{a}ximo} = 13cm$

Con estos resultados se cumple con el criterio de validación de la prueba T-AUT-02, ya que se puede verificar que $|\varepsilon_{m\acute{a}ximo}| = 13cm \leq 20cm$. De esta forma, queda validada la siguiente especificación:

PER-02	El dispositivo no podrá salir más de 30 cm del perímetro demarcado en la instalación.
--------	---

16.2.3. Evasión de objetos

Se realizó la prueba T-AUT-04 y se repitió 10 veces para comparar los resultados obtenidos. Se utilizó el mismo recorrido que para la validación T-AUT-02 pero se agrandaron los límites a 30cm y se colocó un objeto cilíndrico de 20cm de radio y 7cm de altura. Además, se colocaron diversos objetos fuera de la trayectoria para verificar que estos no afecten el recorrido.

La prueba realizada tiene distintos criterios para definir si la especificación fue cumplida, los cuales deben verificarse en cada repetición de la serie.

- **La cortadora de césped debe detectar el objeto:** Esto se pudo verificar tanto mediante inspección visual como a través de la web app. En el primer caso, cada sensor infrarrojo cuenta con un LED de color rojo para que el usuario pueda visualizar si dicho sensor está activo (detectando un objeto). En el segundo, cada vez que se detecta un objeto, la cortadora de césped envía un mensaje a la web app para indicar dicho evento al usuario, como se muestra en la siguiente imagen:

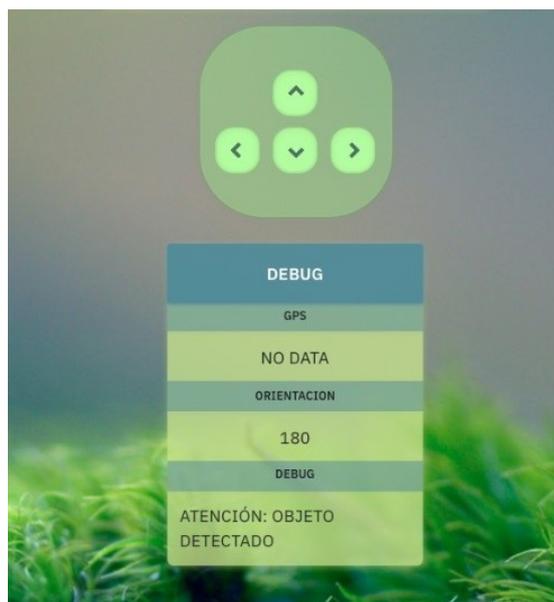


Figura 108 Alerta indicada en la web app

Esto ocurrió en cada repetición realizada, por lo que se concluye que se cumple con el criterio establecido.

- **El equipo debe esquivar el obstáculo y retomar la trayectoria original:** Para comprobar que este criterio fue alcanzado, se analizó la trayectoria de la cortadora en la web app. Se muestra a continuación una de las repeticiones realizadas:

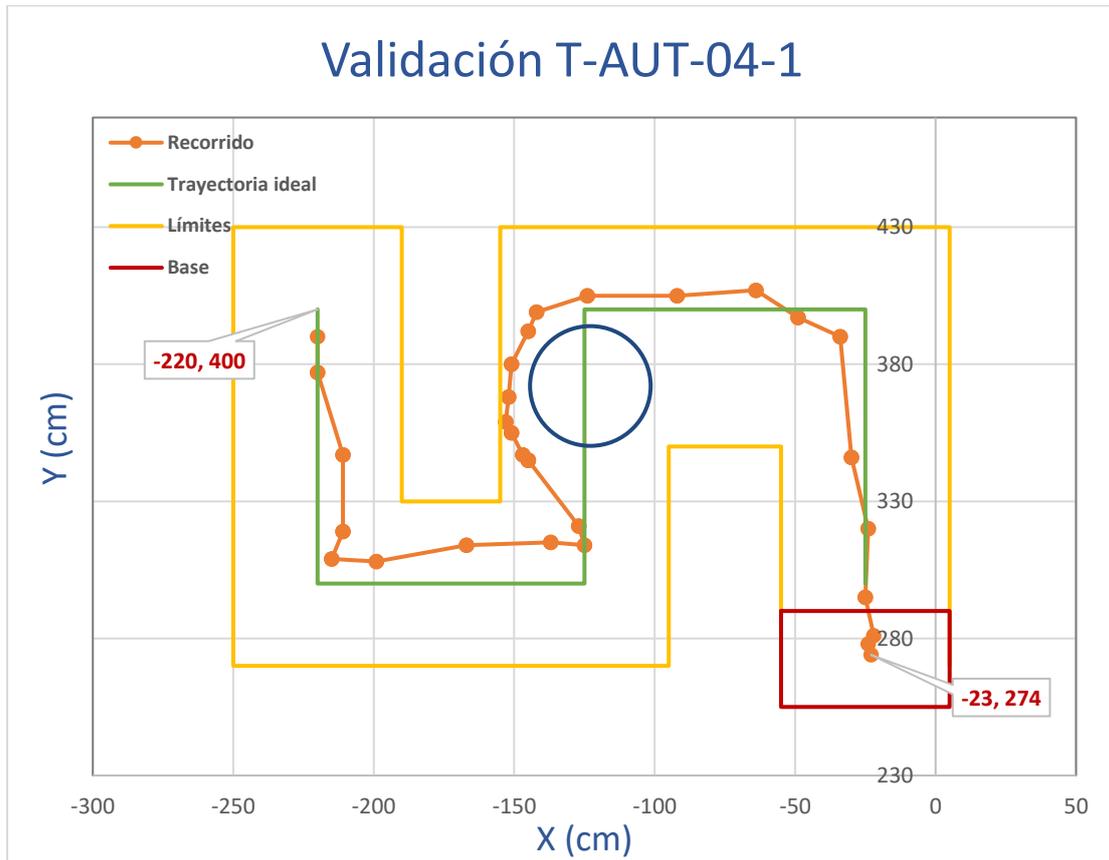


Figura 109 Validación T-AUT--04-1

El centro del obstáculo fue ubicado en las coordenadas $x = -122$, $y = 370$. Se puede observar como la cortadora de césped realiza normalmente el recorrido hasta encontrarse con el objeto. En ese momento, lo bordea hasta retomar la trayectoria, para continuar con el proceso y finalizar en el punto $X = -220$, $Y = 400$.

- **Detener el motor de corte y apagar el LED testigo al encontrarse con un objeto:** Esta parte de la prueba se valida mediante inspección visual. En cada repetición de la serie se observa que, al momento de la detección, tanto el motor de corte como el LED testigo se apagan.

Al cumplirse los criterios definidos, se concluye que la validación T-AUT-04 se realizó correctamente y se validó la siguiente especificación:

FUN-DIS-01	El dispositivo deberá detectar objetos y cambiar su trayectoria en caso de que resulte necesario.
------------	---

16.2.4. Modo Manual

Se realizó la prueba T-MAN-01 para validar el control de la cortadora de césped a través de los controles de la web app en Modo Manual, incluyendo la demarcación de cualquier perímetro.

El perímetro a generar fue identificado con líneas blancas sobre la superficie del banco de pruebas. Luego, se colocó la cortadora en Modo Manual y se intentó guiar al equipo para que siga las líneas marcadas, utilizando los controles de movimiento. Se toma como cota superior un error máximo de 30cm, para contemplar errores en el control de orientación, problemas mecánicos y errores del usuario durante el control remoto.

Se realizaron diversos perímetros, y a continuación se muestra uno de ellos:

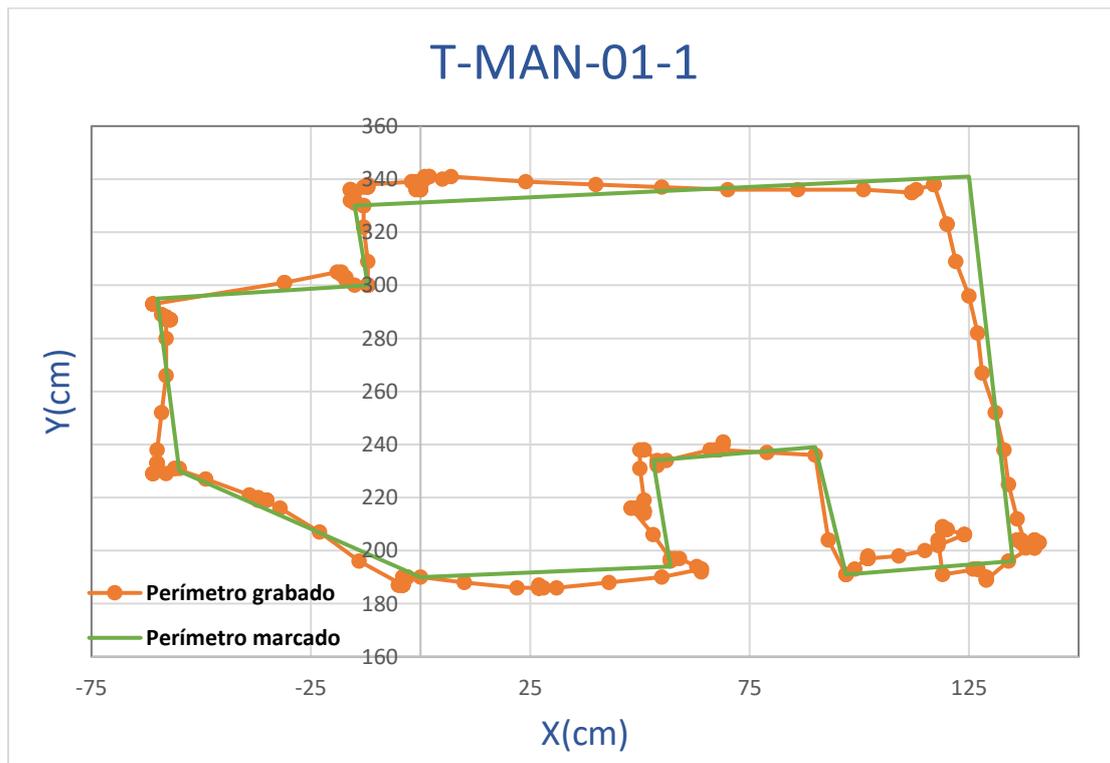


Figura 110 Validación T-MAN-01-1

En color verde se indica el perímetro real que se intenta replicar, mientras que en naranja se pueden observar las mediciones de posición de la cortadora cada medio segundo. Se compararon las posiciones medidas con el perímetro marcado en la banco de pruebas, y se obtuvieron los errores de posición para cada valor. El siguiente gráfico muestra la evolución del error:

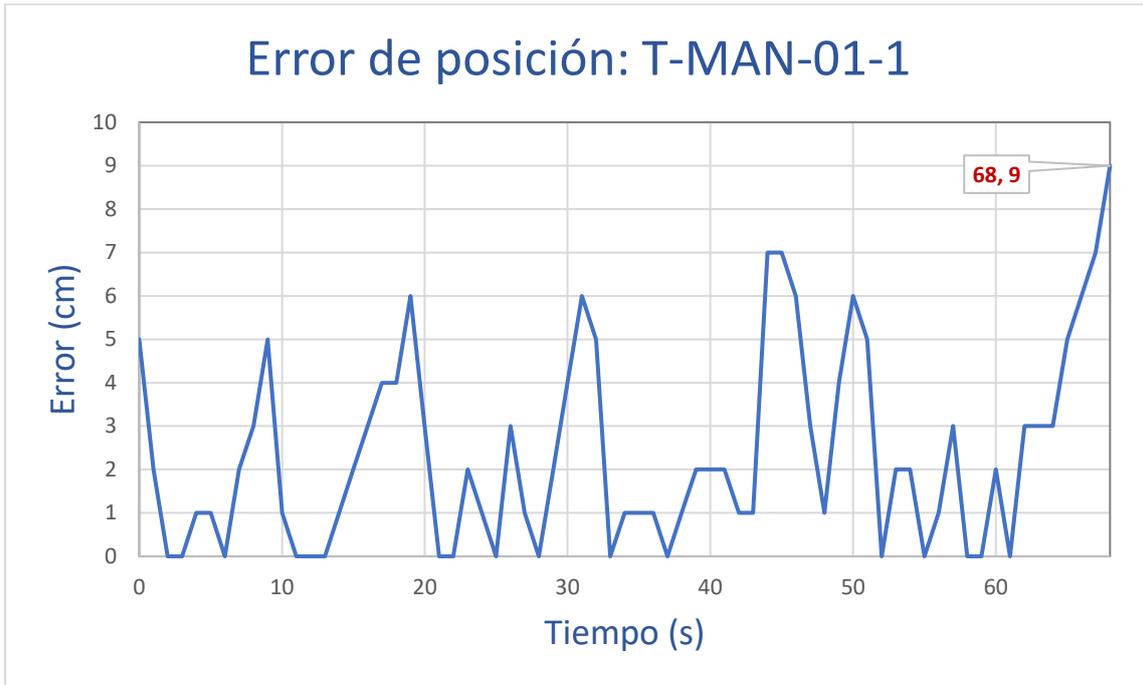


Figura 111 Error de posición en T-MAN-01-1

Se observa que el mayor error es de 9cm y ocurre a los 68 segundos, en el instante final del recorrido. Esto se debe a que el usuario no volvió al punto de partida y finalizó el recorrido a 9cm de distancia del origen. Finalizada la delimitación del perímetro, se guardó el área grabada en la web app.

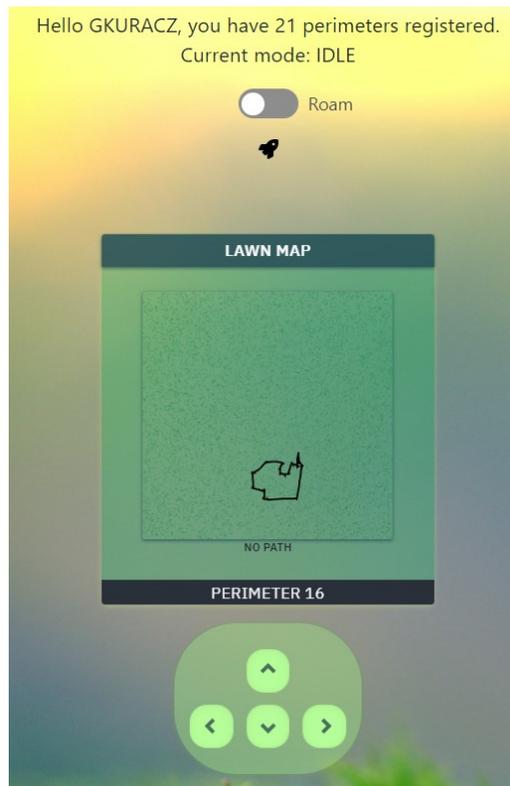


Figura 112 Perímetro grabado en la web app

Con los valores de posición medidos, se obtiene que $|\varepsilon_{m\acute{a}ximo}| = 9cm \leq 30cm$. Además, se verifica que la web app grabó correctamente el perímetro y, por lo tanto, se concluye que la prueba T-MAN-01 fue realizada correctamente y fueron validadas las siguientes especificaciones:

FUN-DIS-03	El dispositivo debe poder realizar todo el recorrido del área a cortar de manera manual, controlado por el usuario a través de un dispositivo móvil.
FUN-INS-01	El usuario debe poder realizar la inicialización del dispositivo y la demarcación del perímetro a cortar de manera manual y sin necesidad de personal especializado.
INT-DAT-01	La web app debe poder definir sistema automático o manual para el proceso de corte.
INT-DAT-02	La web app deberá contar con una interfaz para controlar manualmente la marcha y la dirección del dispositivo.

16.2.5. Recorrido y corte autónomo

Se realizó la prueba T-AUT-01 para validar que la cortadora realice el corte de manera autónoma de todo el césped dentro de un área delimitada.

Previo a esta, se delimitó un perímetro dentro del banco de pruebas y se grabó en la web app. Se colocó el equipo en la base y se ejecutó el Modo Autónomo para comenzar a recorrer la trayectoria generada para el perímetro seleccionado. Se midió la posición en cada momento del recorrido, y se obtuvo el siguiente resultado:

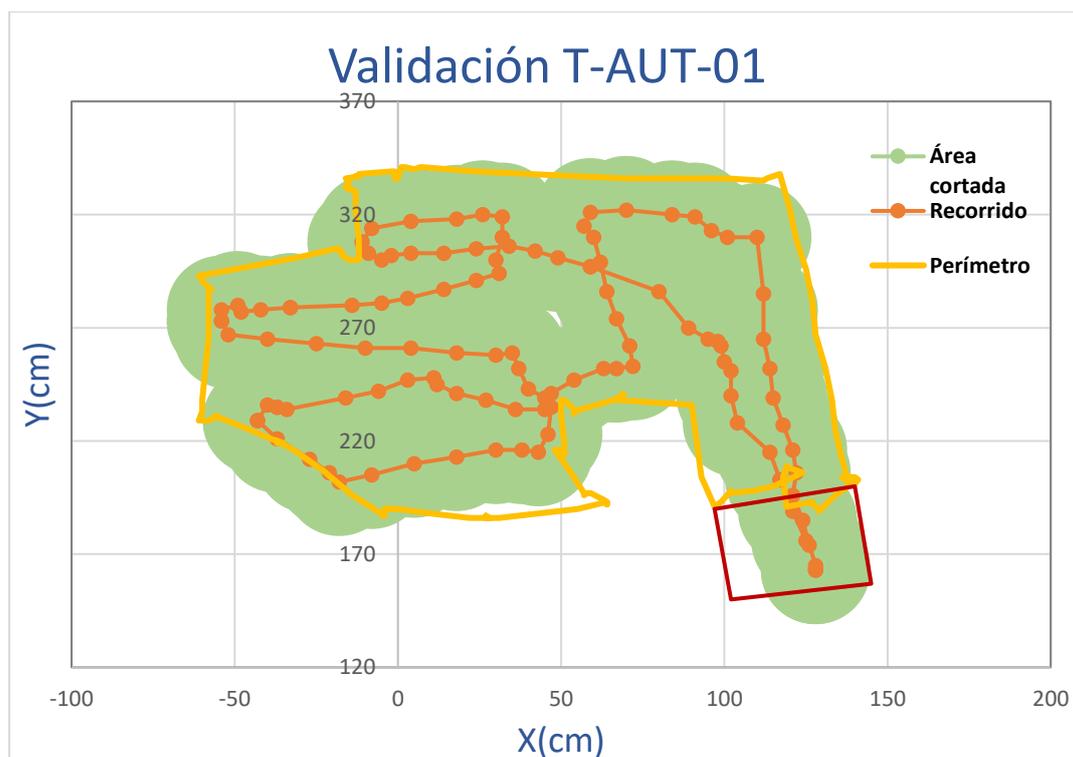


Figura 113 Validación T-AUT-01

En color amarillo se observa el perímetro almacenado en la web app y en naranja las mediciones de la trayectoria realizada por la cortadora de césped. Dado que las mediciones son puntuales, a cada una se le agregó un círculo de 30cm de diámetro para indicar el área de césped que cortará el producto final en cada posición. Esto se debe a que el radio de la tanza para el corte será de 15cm. Finalizado el recorrido autónomo, se verificó en la aplicación el grabado correcto del mismo.

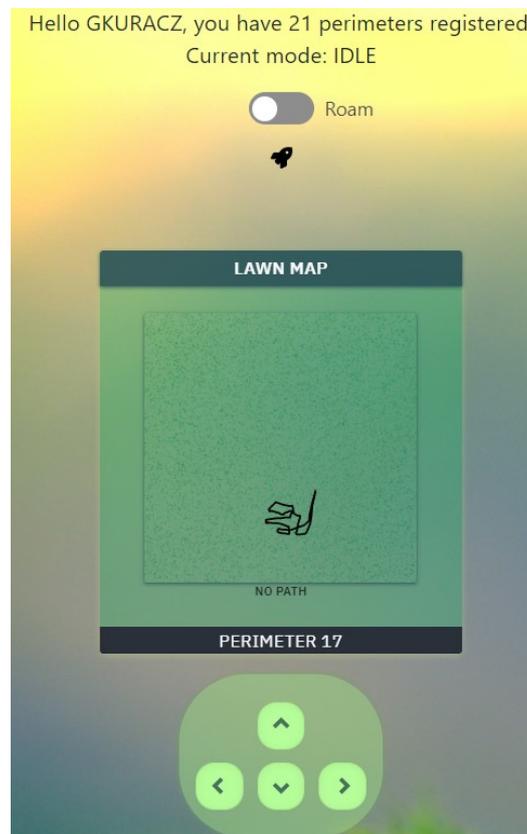


Figura 114 Recorrido grabado en la web app

A partir de la Figura 113 se calculó el área cortada (verde) dentro del perímetro demarcado, y se la comparó con el área total dentro del perímetro. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Área a cortar: 25.128 cm^2
- Área cortada: 24.123 cm^2
- $E_{corte} = 96\%$

Dado que el grabado del recorrido fue realizado correctamente, sin necesidad de recargar la batería ni la intervención del usuario, y con una eficiencia $E_{corte} = 96\% > 95\%$, se concluye que la prueba de validación T-AUT-01 se realizó correctamente y se validaron las siguientes especificaciones:

FUN-DIS-02	El dispositivo debe poder realizar todo el recorrido del área a cortar de manera automática, sin intervención del usuario.
PER-01	El dispositivo deberá poder realizar el proceso de corte entero sin necesidad de recargar la batería (máximo 100m2).

INT-DAT-01	La web app debe poder definir sistema automático o manual para el proceso de corte.
------------	---

16.2.6. Elevación del suelo

La prueba T-AUT-03 fue realizada para validar la seguridad de la cortadora frente a una elevación del equipo o caída del mismo de manera abrupta e inesperada. Se repitieron las condiciones y el recorrido de la validación T-AUT-01 y se levantó la cortadora de césped durante el proceso de corte. Se pudo validar mediante inspección visual que los motores de desplazamiento, el motor de corte y el LED testigo fueron apagados al momento de separar el equipo del suelo. En ese instante, se verificó en la web app que la cortadora de césped notificó la situación.



Figura 115 Alerta de equipo elevado

Por último, también se verificó vía inspección visual que, al volver a colocar la cortadora en el suelo, el proceso de corte no reanuda automáticamente y que requiera de un nuevo inicio a través de la aplicación móvil.

Frente a estos resultados, se concluye que la prueba T-AUT-03 fue realizada correctamente y se pudo validar la siguiente especificación:

INT-AMB-05	El dispositivo deberá detener su proceso si se despega del suelo.
------------	---

17. Conclusiones

Al comienzo de este informe se mencionó como puntos focales del proyecto el aspecto económico del producto final y su facilidad de instalación. Los autores de este trabajo consideran que estos objetivos han sido logrados. Además, se considera que el producto final posee una gran escalabilidad y una adaptabilidad a varios otros rubros, debido a que el posicionamiento con la precisión obtenida y los algoritmos desarrollados para la automatización pueden ser trasladados a diversas aplicaciones, no necesariamente asociados al corte de césped.

En el transcurso de este proyecto, los autores pudieron aplicar conocimientos aprendidos a lo largo de toda la carrera, correspondientes a varias áreas de la electrónica, ya sea comunicaciones inalámbricas, sistemas de control, electrónica de potencia, posición satelital o procesamiento de imágenes.

También se pudo trabajar en la frontera tecnológica en cuanto a cortadoras de césped autónomas, innovando frente a las existentes.

Finalmente, se puso a prueba la habilidad de adaptarse a circunstancias de fuerza mayor, al haber tenido que desarrollar un producto de semejante envergadura en medio de una pandemia, sin acceso a los recursos normalmente disponibles.

18. Anexo

18.1. Proyecciones de ventas

Para estimar las ventas dentro de los primeros 10 años del producto en el mercado, se analizaron las ventas de los modelos AutoMower y similares de la empresa Husqvarna (principal competidor) a nivel mundial. Si bien los números no son comparables con una empresa en desarrollo, se toman como referencia para observar la evolución de las ventas a lo largo de los años y analizar la tendencia.

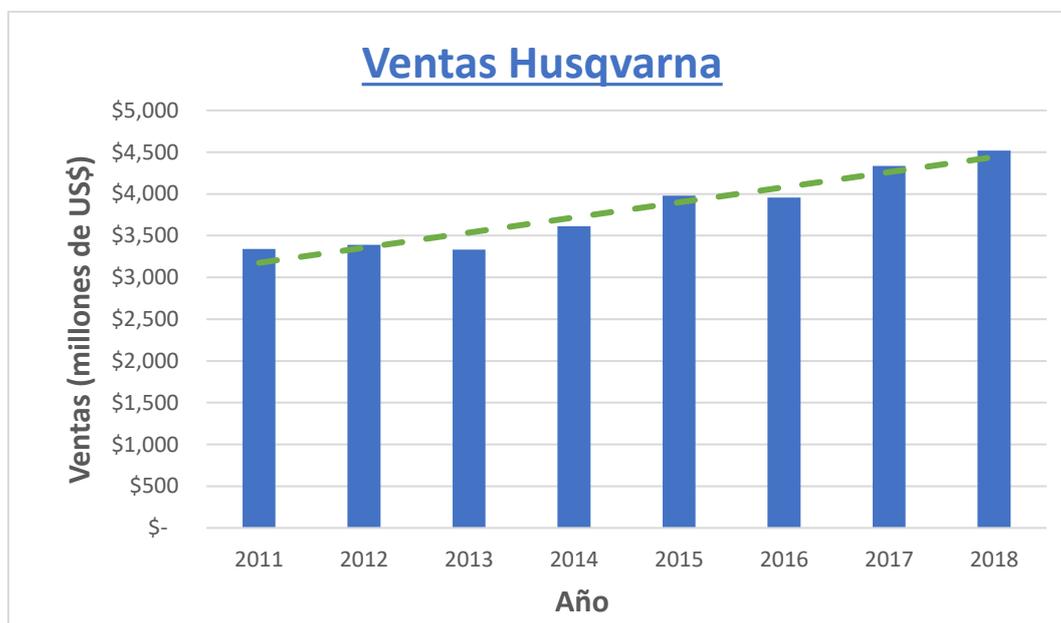


Figura 116 Ventas del modelo AutoMower de Husqvarna

Tomando la línea de tendencia ascendente, se observa un crecimiento del 5,5% anual en las ventas. Se utilizará este valor para proyectar la tendencia de ventas de este proyecto, y se asume esa tasa de crecimiento aumentará un 50% frente a inversiones en publicidad, equipamiento y personal.

Para analizar el primer año de ventas, se toman como referencia los distribuidores de la empresa Husqvarna en Argentina que operan a través de MercadoLibre. Tras consultar con tres vendedores, se obtuvo que en sus primeros años de ventas lograron vender en promedio 240 unidades de modelos AutoMower o similares. Asumiendo que cada tres años se aumentan los gastos en personal y publicidad, se estimaron las ventas para los primeros 10 años:

Año	Ventas (unidades)	Tasa de crecimiento
0	-	-
1	240	-
2	253	5.5%
3	267	5.5%
4	289	8.25%
5	313	8.25%
6	339	8.25%
7	376	11%
8	418	11%

9	464	11%
---	-----	-----

Tabla 66 Tasa de crecimiento los primeros 10 años

18.2. Esquemáticos

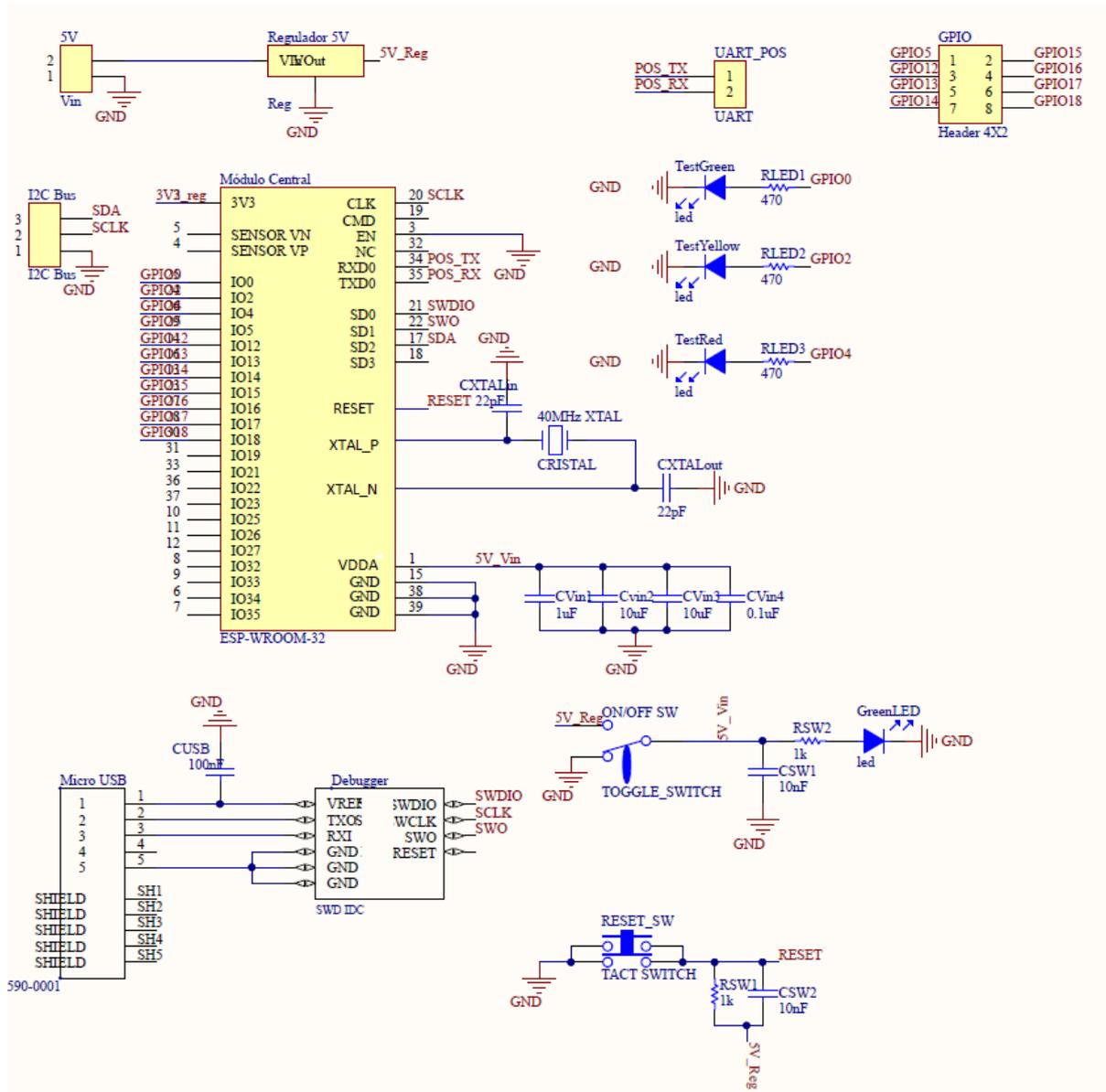


Figura 117. Módulo Central para el Producto Final

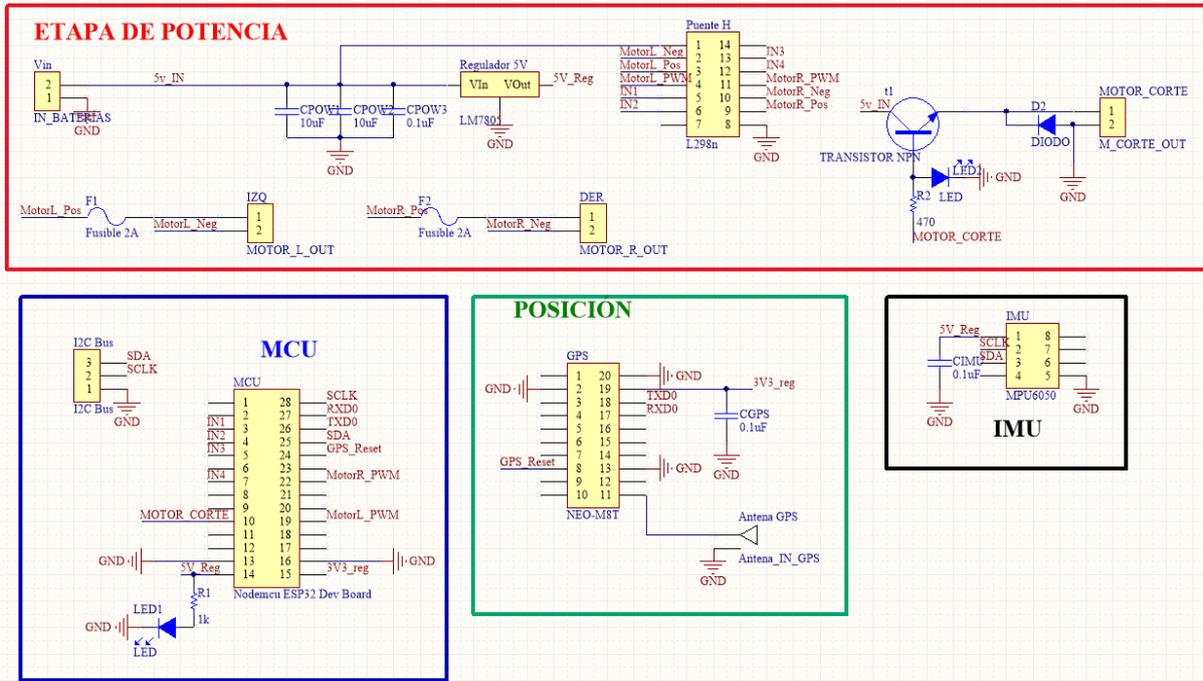


Figura 118 Módulo Central implementado en el prototipo (se utilizó la placa de desarrollo Nodemcu ESP32, por lo cual se representa a través de su pinout)

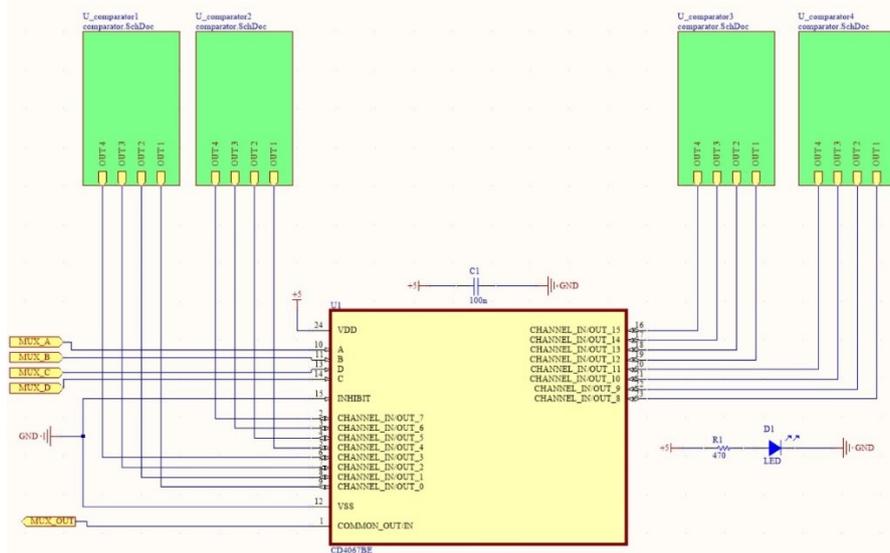


Figura 119 Esquemático del multiplexor conectado a los módulos U_comparatorX que corresponden a los módulos comparador y las señales recibidas de los receptores infrarrojos.

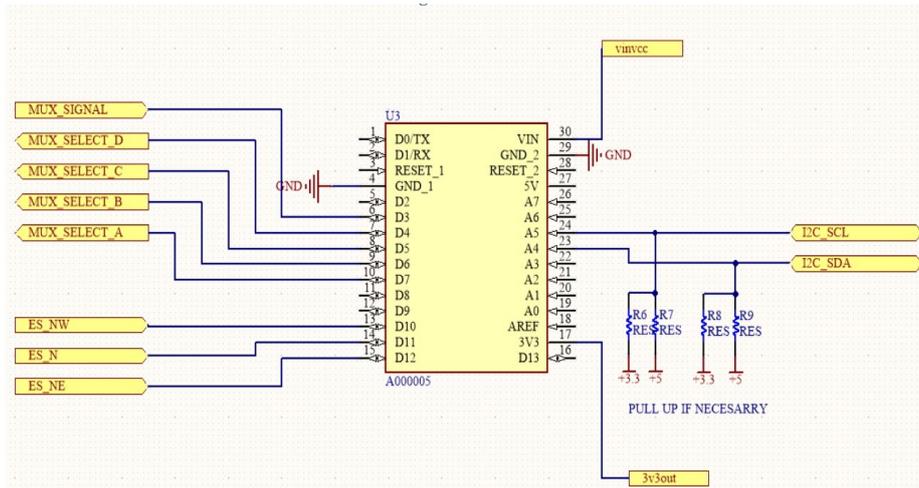


Figura 120 Esquemático de las conexiones del microcontrolador del módulo detección de objetos.

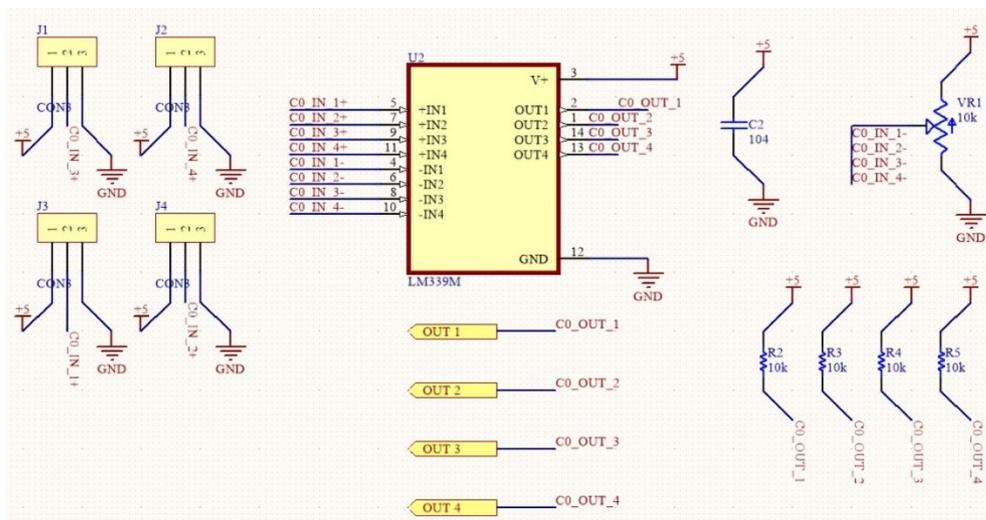


Figura 121 Esquemático del módulo con el comparado para las señales recibidas de los infrarrojos.

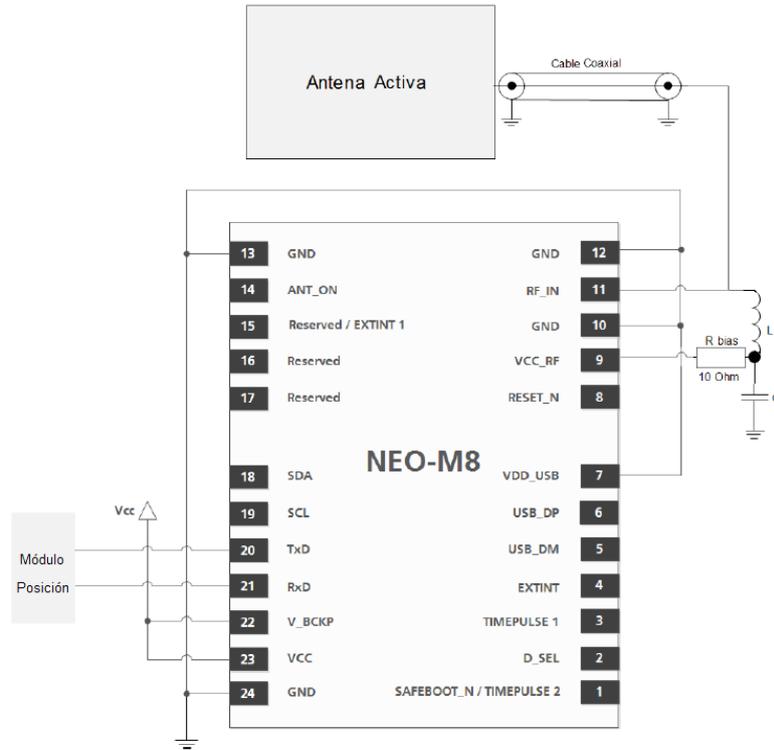


Figura 122 Esquemático para la conexión del receptor GNSS a la antena activa y el módulo posición.

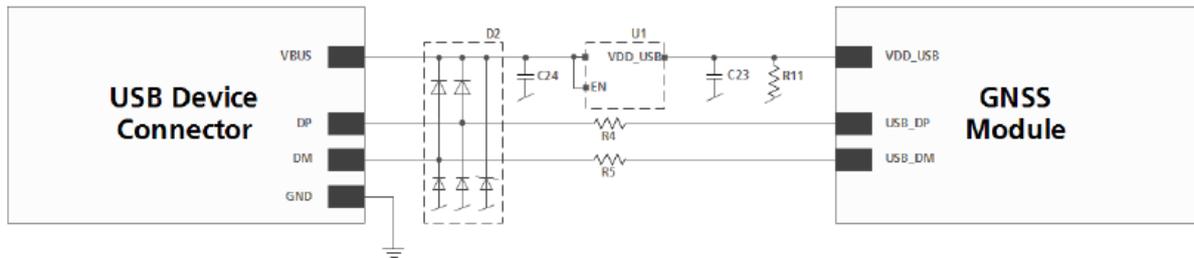


Figura 123 Esquemático para la conexión del receptor GNSS al conector USB.

18.3. Algoritmo de detección y evasión de objetos: The Bubble Rebound Algorithm

Este algoritmo está basado en varios algoritmos como the “Bug Algorithm”, “Potential Field Algorithm”, “Vector Field Histogram (VFH)” y “Bubble Band technique” donde se resuelve de manera distinta pero progresivo el problema. Es decir, en cada uno de estos algoritmos se busca bordear el objeto en cuestión hasta tener el punto objetivo al alcance sin que la cortadora quede obstruida. Esto último es fundamental ya que se puede mantener el mapeo o corte programado hecho por el usuario y no generar movimientos aleatorios al encontrarse con un objeto para evitarlo.

La idea principal de este algoritmo, además de llegar a un objetivo determinado, es generar una “burbuja” o “bubble” virtual libre alrededor del dispositivo donde no debe haber objetos que

puedan obstruir la marcha. Esta burbuja estará determinada por el alcance de los sensores y la geometría del producto. Para el caso de uso, esta burbuja generada solo abarca 180° grados por la disposición de los sensores.

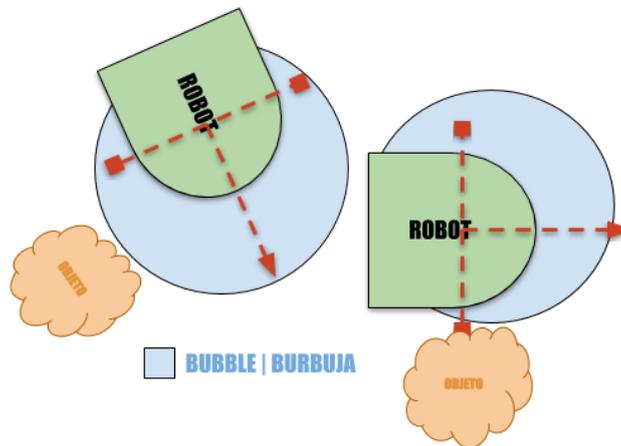


Figura 124. La burbuja generada por los sensores que se adapta a los objetos presentes y corrección de trayectoria

Dado que los sensores traen aparejado ruido ocasionado por interferencias externas es necesario considerar la utilización de algún algoritmo probabilístico. Por este motivo, se genera un histograma polar donde se tendrán las últimas mediciones obtenidas de los sensores. A partir de esto se obtiene una grilla o mapa para obtener la probabilidad de encontrar un objeto alrededor del equipo. Dado que se debe minimizar el tiempo de procesamiento para actuar sobre posibles colisiones, se extrapola este concepto y se utiliza un umbral donde cualquier valor superior a este se interpreta como un posible objeto. Con estas consideraciones se observa si dicho valor se mantiene constante evitando la interpretación errónea o esporádica de objetos.

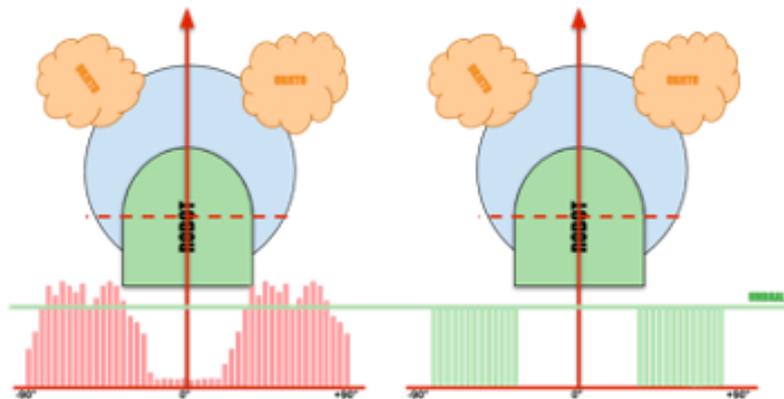


Figura 125. Histograma generado con la lectura de los sensores que muestran algunos objetos presentes.