



Instituto Tecnológico de Buenos Aires

ESCUELA DE INGENIERIA Y TECNOLOGÍA

SIPROREFA:

SISTEMA DE PROTECCIÓN DE KARTING ELÉCTRICO CON REDUNDANCIA ANTE FALLAS

Autores:

Milagros Moutin (59282)

Gianfranco Muscariello (60361)

Tobías Demeco (60557)

Tutores:

Manuel Esteban Carrillo Del Pino

Walter Orchessi

Ignacio Gasparini

Pablo Fabian Regazzoni

Agradecimientos

A nuestras familias, que nos acompañaron y apoyaron durante todo el transcurso de nuestra formación profesional.

A nuestros amigos, por ser el eje que nos recordaba que hay que disfrutar de esta etapa.

A nuestros profesores, por guiarnos y ayudarnos tanto con problemas profesionales como personales.

Al Departamento de Electrónica, por facilitarnos el aprendizaje incluso ante las condiciones más adversas.

Índice

Agradecimientos	1
Acrónimos y Definiciones	11
Resumen	13
1. Introducción	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Contexto del Proyecto	14
2. Objetivos	15
2.1. Finalidad del Proyecto	15
2.2. Planteamiento del Problema a Resolver	15
2.3. Alcance	15
3. Definición del Producto	16
3.1. Requerimientos del Cliente	16
3.1.1. Relevamientos de Datos	16
3.1.2. Casa de Calidad	16
3.1.3. Requerimientos Finales para Trazabilidad	17
3.2. Diagrama Funcional de Interfaces	19
3.3. Especificaciones de Diseño	19
3.3.1. Especificaciones Funcionales	19
3.3.2. Especificaciones de Interfaz	20
3.3.3. Especificaciones de Performance	23
3.3.4. Especificaciones de Implementación	23
3.3.5. Especificaciones de Servicio (RAMS)	24
4. Plan de Validación	25
4.1. Diseño de Banco de Pruebas	25
4.2. Especificaciones de Tests	28
4.3. Validación por documentación	33
4.4. Matriz de Trazabilidad de Validación	34
4.5. Plan de Verificación y Validación	35

5. Análisis de Factibilidad	36
5.1. Factibilidad Tecnológica	36
5.1.1. Esquema Modular	37
5.1.2. Implementación del modulo UC-1/UC-2	37
5.1.2.1. Alternativa de diseño	37
5.1.2.2. Elección de una solución	38
5.1.3. Implementación del modulo PWR-ISO	38
5.1.3.1. Alternativa de diseño	38
5.1.3.2. Elección de una solución	39
5.1.4. Implementación del modulo PWR-BMS	39
5.1.4.1. Alternativa de diseño	39
5.1.4.2. Elección de una solución	39
5.1.5. Implementación del modulo PWR-BAT	40
5.1.5.1. Alternativa de diseño	40
5.1.5.2. Elección de una solución	40
5.1.6. Implementación del módulo PWR-REG	40
5.1.6.1. Alternativa de diseño	40
5.1.6.2. Elección de una solución	41
5.1.7. Implementación del módulo KRT-TEMP	41
5.1.7.1. Alternativa de diseño	41
5.1.7.2. Elección de una solución	41
5.1.8. Implementación del módulo KRT-CUR	42
5.1.8.1. Alternativa de diseño	42
5.1.8.2. Elección de una solución	42
5.1.9. Implementación del módulo KRT-VLT	42
5.1.9.1. Alternativa de diseño	42
5.1.9.2. Elección de una solución	43
5.1.10. Implementación del módulo KRT-ACC	43
5.1.10.1. Alternativa de diseño	43
5.1.10.2. Elección de una solución	43
5.1.11. Implementación del módulo KRT-CAN	44
5.1.11.1. Proceso de implementación	44
5.1.11.2. Ventajas de la implementación	44
5.1.12. Implementación del módulo KRT-OUT	45

5.1.12.1. Proceso de implementación	45
5.1.12.2. Ventajas de la implementación	45
5.1.13. Implementación del módulo USR-DGN	45
5.1.13.1. Proceso de implementación	45
5.1.13.2. Ventajas de la implementación	46
5.1.14. DFMEA	46
5.2. Factibilidad de Tiempos	46
5.3. Factibilidad Económica (Mercado, costos, ciclo de vida, VAN, TIR)	50
5.3.1. Modelo de negocios	50
5.3.2. Mercado	50
5.3.3. Costos	51
5.3.3.1. Inversión Inicial	51
5.3.3.2. Costos Fijos	51
5.3.3.2.1. Sueldos	52
5.3.3.3. Costos Variables	53
5.3.4. Ingresos	53
5.3.5. VAN y TIR	55
5.4. Factibilidad Legal y Responsabilidad Civil (Regulaciones y licencias)	55
5.4.1. Responsabilidad Civil	55
6. Ingeniería de Detalle	57
6.1. Hardware	57
6.1.1. Diagrama en Bloques (Hardware)	57
6.1.2. Descripción detallada de cada bloque	57
6.1.2.1. Unidad de Control	57
6.1.2.2. Sensores de temperatura	57
6.1.2.3. Sensores de tensión	58
6.1.2.4. Sensores de actividad del bus CAN	59
6.1.2.5. Sensores de corriente	59
6.1.2.6. Acelerómetro	60
6.1.2.7. Implementación de la interfaz de salida	60
6.1.2.8. Proceso de implementación	60
6.1.2.9. Alimentación auxiliar	61
6.1.3. Detalles de Selección y Cálculo de los Elementos Circuitales de cada Bloque	61

6.1.3.1. Temperatura	61
6.1.3.2. Tensión	63
6.1.3.3. Corriente	64
6.1.3.4. Bus CAN	65
6.1.4. Plan de Prueba de cada Módulo	66
6.2. Software	67
6.2.1. Diagrama de Estados y Flujogramas	67
6.2.2. Listados Comentados del Código	70
6.2.2.1. Código ESP32	70
6.2.2.2. Código FPGA	72
7. Construcción del Prototipo	74
7.1. Definición de los Módulos	74
7.2. Diseño de los Circuitos Impresos	74
7.2.1. Circuito impreso de la unidad de procesamiento	74
7.2.2. Circuito impreso del modulo de salida	76
7.2.3. Circuito impreso del sistema de alimentación	78
7.3. Instalación de sensores en el Karting	78
7.4. Bill Of Materials (BOM)	81
8. Validación del Prototipo	84
8.1. Estudios de Confiabilidad de Hardware y Software	84
8.1.1. Hardware	84
8.1.1.1. Sensores de Corriente - I_1 e I_2	85
8.1.1.2. Sensores de Tensión - V_1 y V_2	86
8.1.1.3. Sensores de Temperatura - T_1 y T_2	87
8.1.1.4. Sensores de Bus CAN - C_1 y C_2	87
8.1.1.5. Sensores de Aceleración - A_1 y A_2	88
8.1.1.6. Unidades de Control - U_1 y U_2	89
8.1.1.7. Circuito de Salida - O_1 y O_2	89
8.1.1.8. Sistema de alimentación - P_1	90
8.1.1.9. Placa Circuito Impreso - PCB	91
8.1.1.10. Confiabilidad Final	91
8.1.2. Software	92

9. Conclusiones	94
9.1. Cumplimiento de Objetivos	94
9.2. Lecciones Aprendidas	94
9.3. Recomendaciones para Futuros Diseños	94
10. Referencias	95
11. Anexos Técnicos	96
11.1. Esquemáticos	96
11.2. Planos de PCB	103
11.3. Listado de Partes y Componentes (BOM)	106
11.4. Códigos de Software	107
11.4.1. FPGA	107
11.4.2. Microprocesador	109

Índice de figuras

3.1. Casa de Calidad	16
3.2. Diagrama Funcional de Interfaces	19
4.1. Plan de validación	36
5.1. Esquema Modular	37
5.2. DFMEA	46
5.3. Diagrama PERT ideal.	48
5.4. Diagrama de Gantt del proyecto asumiendo un trabajo continuo que comienza en marzo de 2022.	49
5.5. Diagrama de Gantt considerando retrasos causados por exámenes y compromisos laborales.	50
6.1. Diagrama en bloques de hardware	57
6.2. Diagrama en bloques modulo de temperatura	58
6.3. Diagrama medición aislada de tensión.	58
6.4. Diagrama medición de tensión no aislado.	59
6.5. Diagrama para el sensor Efecto Hall ACS772.	59
6.6. Diagrama para el sensor Efecto Hall LCSC10T12.	60
6.7. circuito de medición de temperatura	61
6.8. Circuito de medición de tensión.	63
6.9. Circuito de medición de corriente.	64

6.10. La señales V_H y V_L son recibidas por el sistema que debe detectar la presencia de actividad en el bus.	65
6.11. Circuito de detección de señal CAN.	65
6.12. Diagrama de Estados - Software Microprocesador	67
6.13. Diagrama de estados - Firmware FPGA	68
7.1. Vista 3D desde Altium	74
7.2. Implementación física del primer prototipo	75
7.3. Vista 3D desde Altium	75
7.4. Implementación física del segundo prototipo	76
7.5. Descripción del placement para el segundo prototipo fabricado.	76
7.6. Implementación física del primer prototipo	77
7.7. Vista 3D desde Altium	77
7.8. Implementación física del segundo prototipo	78
7.9. Vista 3D	78
7.10. Ubicación placa principal	79
7.11. Ubicación sensores de temperatura	79
7.12. Ubicación de la conexión al bus CAN	80
7.13. Ubicación de los sensores de tensión	80
7.14. Ubicación de los sensores de corriente	81
7.15. Ubicación del circuito de salida	81
8.1. Diagrama de Confiabilidad del sistema	84
8.2. Diagrama de Confiabilidad del sistema de alimentación	90
11.1. Esquematico Mainboard.	96
11.2. Esquematico Mainboard 2.	97
11.3. Esquematico sensor de tensión.	98
11.4. Esquematico sensor de corriente 1.	98
11.5. Esquematico sensor de corriente 2.	99
11.6. Esquematico de conexión al CAN	99
11.7. Esquematico acelerómetro 1.	100
11.8. Esquematico acelerómetro 2.	100
11.9. Esquematico sensor de temperatura.	101
11.10. Esquematico señales de salida.	102
11.11. PCB Mainboard.	103
11.12. PCB Power Delivery Unit.	104
11.13. PCB Output.	105

Índice de tablas

3.2. Leyenda de uso en especificaciones	19
3.3. Especificaciones Funcionales.	20
3.4. Especificaciones de Interfaz VIN.	20
3.5. Especificaciones de Interfaz OUT.	20
3.6. Especificaciones de Interfaz USR.	21
3.7. Especificaciones de Interfaz MEC.	21
3.8. Especificaciones de Interfaz KRT.	22
3.9. Especificaciones de Performance.	23
3.10. Especificaciones de Operación.	23
3.11. Especificaciones Dimensionales y de Peso.	23
3.12. Especificaciones de Confiabilidad.	24
3.13. Especificaciones de Seguridad.	24
4.1. Diseñó Banco de Pruebas #1	25
4.2. Diseñó Banco de Pruebas #2	25
4.3. Diseñó Banco de Pruebas #3	26
4.4. Diseñó Banco de Pruebas #4	26
4.5. Diseñó Banco de Pruebas #5	27
4.6. Diseñó Banco de Pruebas #6	27
4.7. Diseñó Banco de Pruebas #7	28
4.22. A validar por inspección de la documentación	34
4.23. Matriz de trazabilidad	35
5.1. Comparación entre Microprocesadores.	38
5.2. Comparación entre FPGAs.	38
5.3. Comparación entre alternativas para el módulo PWR-ISO.	39
5.4. Comparación entre alternativas para el módulo PWR-BMS.	39
5.5. Comparación entre baterías Li-Ion, Li-Po y ultracapacitores para el módulo PWR-BAT.	40
5.6. Comparación entre reguladores de tensión para el módulo PWR-REG.	41
5.7. Comparación entre sensores de temperatura para el módulo KRT-TEMP.	41
5.8. Comparación entre métodos de medición de corriente para el módulo KRT-CUR.	42
5.9. Comparación entre métodos de medición de tensión para el módulo KRT-VLT.	43
5.10. Comparación entre acelerómetros para el módulo KRT-ACC.	43

5.11. Tabla de actividades para el desarrollo del proyecto.	47
5.12. Inversión Inicial	51
5.13. Costos Fijos	52
5.14. Aportes	52
5.15. Costo Mano de Obra	53
5.16. Costos Variables	53
5.17. Precio del producto	54
5.18. Ingresos trimestrales	54
5.19. Flujo de fondos operativos	54
5.20. Flujo de fondos netos	55
5.21. Indicadores VAN y TIR	55
6.1. Componentes utilizados para la implementación del circuito de medición de temperatura	62
6.2. Se utilizaron distintas marcas y fabricantes para el circuito de medición de tensión se la Figura 6.8	63
6.3. Componentes utilizados para la implementación del circuito de la Figura 6.9.	65
6.4. Componentes utilizados para la implementación del circuito de la Figura 6.11.	66
7.1. Lista de componentes (BOM)	83
8.1. Ecuaciones de tasa de fallos de componentes electrónicos	85
8.2. Confiabilidad componentes modulo de corriente	86
8.3. Confiabilidad modulo de sensado de corriente y submodulos	86
8.4. Confiabilidad componentes del módulo de tensión	86
8.5. Confiabilidad módulo de sensado de tensión y submódulos	87
8.6. Confiabilidad componentes del módulo de temperatura	87
8.7. Confiabilidad módulo de sensado de temperatura y submódulos	87
8.8. Confiabilidad componentes del modulo del bus CAN	88
8.9. Confiabilidad módulo de sensado de bus CAN y submódulos	88
8.10. Confiabilidad componentes del modulo de aceleración	88
8.11. Confiabilidad módulo de sensado de aceleración y submódulos	89
8.12. Confiabilidad modulo ESP32	89
8.13. Confiabilidad modulo FPGA Upduino	89
8.14. Confiabilidad componentes circuito de salida	89
8.15. Confiabilidad módulo salida y submódulos	90
8.16. Confiabilidad componentes módulo de alimentación	90
8.17. Confiabilidad modulo de alimentación	91
8.18. Confiabilidad del circuito impreso	91

8.19. Confiabilidad circuito impreso	91
8.20. Confiabilidad de la rama donde los modulos de control y salida se encuentran serie	92
8.21. Confiabilidad total del protipo	92
8.22. Tiempo medio entre fallas	92
8.23. Relevamiento de fallas detectadas y corregidas del software durante el período de testing.	93
11.1. Lista de Materiales (BOM)	106
11.2. Lista de Materiales (BOM) - 2	107

Acrónimos y Definiciones

Acrónimo	Descripción
AC	Corriente Alterna (<i>Alternate Current</i>)
BMS	(<i>Battery Management System</i>)
DC	Corriente Continua (<i>Direct Current</i>)
DSP	Procesador de Señales Digitales (<i>Digital Signal Processor</i>)
DUT	(<i>Device Under Test</i>)
ECM	(<i>Electronic Control Module</i>)
ECU	(<i>Electronic Control Unit</i>)
EMC	Compatibilidad Electromagnética (<i>ElectroMagnetic Compatibility</i>)
EV	(<i>Electronic Vehicle</i>)
FPGA	Field Programable Gate Array
HW	<i>Hardware</i>
PCB	Circuito Impreso (<i>Printed Circuit Board</i>)
PLC	Controlador Lógico Programable (<i>Programmable Logic Controller</i>)
SW	<i>Software</i>
TBD	<i>To Be Determined</i>
μC	Microcontrolador (ver definiciones)
μP	Microprocesador (ver definiciones)
VAC	Volts de corriente alterna (AC)
VDC	Volts de corriente continua (DC)

Término	Definición
DSP	Un DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesado y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras, normalmente provenientes de un conversor analógico/digital (ADC). Se puede trabajar con señales analógicas, pero es un sistema digital, por lo tanto, necesitará un conversor analógico/digital a su entrada y digital/analógico en la salida. Como todo sistema basado en procesador programable necesita una memoria donde almacenar los datos con los que trabajará y el programa que ejecuta.

Microcontrolador	Un microcontrolador difiere de un microprocesador, debido a que es más fácil convertirla 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 en 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").
FPGA	Una FPGA es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada <i>in situ</i> mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.
PLC	Un controlador lógico programable, o autómata programable, es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas. Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real duradero, donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.

Resumen

Este informe de proyecto final de la carrera de Ingeniería Electrónica es sobre un sistema de protección ante distintas fallas que pueden ocurrir en un karting eléctrico. Este sistema utiliza redundancia para maximizar el tiempo de funcionamiento y maximizar la probabilidad de detectar una falla cuando efectivamente se ha dado, o dígase de otro modo, maximizar la precisión y exhaustividad de la detección. Además, al detectar una falla se toman acciones protectivas para evitar mayores inconvenientes en el karting.

Para su realización, se tienen en cuenta los requerimientos y especificaciones del producto acordes a las necesidades del cliente: el Centro de I+D en Electrónica Industrial (CIDEI) del Instituto Tecnológico de Buenos Aires. El CIDEI se dedica a impulsar la innovación y el desarrollo en diseño industrial. Desde hace 5 años, se ha estado desarrollando un karting, creado íntegramente por docentes y alumnos de la universidad. Esta iniciativa ha generado la necesidad de implementar un sistema de protección para salvaguardar tanto los diferentes módulos en desarrollo como a los alumnos y docentes que operan el karting durante sus pruebas.

Por la naturaleza del problema, y luego del estudio de las posibles alternativas para implementar una solución, se elige la implementación de un sistema de votación ante errores utilizando hardware de procesamiento en conjunto con un sistema de procesamiento de software para aumentar la redundancia y evitar errores no corregibles que podrían surgir con una implementación puramente en software, debido a posibles errores causados por bit flips aleatorios por radiación o bugs en el software.

1. Introducción

Todo vehículo automotriz debe llevar un monitoreo de las variables importantes dentro de sus sistemas y actuar en consecuencia. De no existir esta etapa de control podrían surgir problemas y fallas que pongan en peligro al usuario y la propia integridad del vehículo.

Esto es aún más cierto en un vehículo utilizado como medio de desarrollo o prueba de concepto, como lo es el karting eléctrico del cliente, ya que existe una probabilidad mayor de ocurrencia de fallas que pueden dañar la integridad del vehículo.

Es por esto que el desarrollo de este sistema de protección es fundamental para el cliente, para proteger al usuario que realiza el testeo del vehículo, para evitar costos extra de reparación ante fallas contenibles, y para analizar luego de una falla cual fue la causa y así evitar que se repita.

En síntesis, este proyecto apunta a diseñar un sistema de protección para el karting eléctrico desarrollado por el cliente, que sea de bajo costo y un nivel alto de confiabilidad, y así proteger la integridad del vehículo durante si etapa de desarrollo.

1.1. Antecedentes

En la actualidad hay diversas formas de solucionar esta problemática. La más popular es la utilización de ECUs o ECMs para controlar los diferentes aspectos del vehículo. Por ejemplo, para controlar el sistema de alimentación existen los BMS que, además de proteger la batería si se encuentra fuera de su zona de operación segura. Estas soluciones monitorean su estado, controla el sistema de recarga, almacena datos secundarios, etc.

El principal problema de las soluciones mencionadas es el costo y su complejidad: están diseñadas para controlar sistemas de automóviles mucho más complejos y regulados que el que posee el cliente, con funcionalidades no necesarias en este caso particular y consideraciones de seguridad mucho mayores que provocan que las soluciones tengan un costo mucho mayor y sean más difíciles de integrar en un vehículo.

1.2. Contexto del Proyecto

El proyecto surge gracias a la propuesta de uno de los directivos del Centro de Innovación en Diseño y Estrategia Industrial (CIDEI) del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), nuestro cliente, ante la necesidad de desarrollar un producto que satisfaga las necesidades de protección del karting eléctrico en desarrollo. El CIDEI se dedica a impulsar la innovación y el desarrollo en diseño industrial, y desde hace 5 años, docentes y alumnos de la universidad han estado trabajando en la creación de un karting eléctrico. Esta iniciativa ha planteado la necesidad crítica de implementar un sistema de protección robusto que no solo asegure el funcionamiento óptimo de los diversos módulos en desarrollo, sino que también garantice la seguridad de los alumnos y docentes durante las pruebas. Para abordar esta problemática, se ha decidido implementar un sistema de votación ante errores utilizando hardware de procesamiento combinado con un sistema de procesamiento de software, aumentando así la redundancia y evitando errores no corregibles que podrían surgir debido a bit flips aleatorios por radiación o bugs en el software.

2. Objetivos

2.1. Finalidad del Proyecto

Con este proyecto se busca proveer al cliente de un sistema de protección confiable que permita proteger la integridad de los distintos módulos que conforman el karting así como al conductor frente a ciertos escenarios críticos.

2.2. Planteamiento del Problema a Resolver

Actualmente el karting se encuentra en desarrollo, con varios equipos trabajando en paralelo en los distintos módulos. Si bien muchos módulos no fueron aún validados, para ciertas pruebas se requiere poner en funcionamiento el equipo completo y al hacerlo pueden ocurrir errores que ponen en peligro la integridad de la integridad del equipo. No tener una protección ante estos escenarios impide poder avanzar con las pruebas de validación correspondientes, o al menos hacerlo sin arriesgar dañar el equipo. Por otro lado, inclusive cuando todos los módulos estén validados, está contemplado que ciertas fallas poseen probabilidad no despreciable de ocurrir, que se traducen en valores de tensión, corriente y temperatura por fuera de los rangos de operación habituales y que ponen en peligro la integridad ya no solo del sistema, sino también del conductor. Es por esto que los parámetros a medir son los mismos tanto para el karting en desarrollo como para el producto terminado, por lo que nuestro producto será útil incluso estando los distintos módulos validados.

2.3. Alcance

Se busca proteger al karting ante una lista acotada de errores posibles provista por el cliente. No se contempla la posibilidad de que nuestra solución proteja al sistema ni al conductor ante errores que no fueron mencionados por el cliente como críticos, aunque estos impliquen un riesgo tanto para el conductor como para el equipo. Sin embargo, ante un acontecimiento crítico la solución propuesta tiene que tener un alto nivel de confiabilidad para asegurar la protección.

Los parámetros que se van a medir en el karting serán la tensión del banco de baterías, las temperaturas de los inverters, la corriente de los inverters, la aceleración, y la inactividad del bus CAN. Estas mediciones luego serán utilizadas para determinar si los valores están dentro de los rangos permitidos, con redundancia a través del sistema de votación, y de no estarlo se activará el sistema de protección ante fallas.

3. Definición del Producto

3.1. Requerimientos del Cliente

3.1.1. Relevamientos de Datos

Los datos necesarios para la estructuración de los requerimientos se obtuvieron tras una serie de reuniones con el cliente, en las que se debatieron cuales serían los requerimientos fundamentales que debe tener nuestro producto.

3.1.2. Casa de Calidad

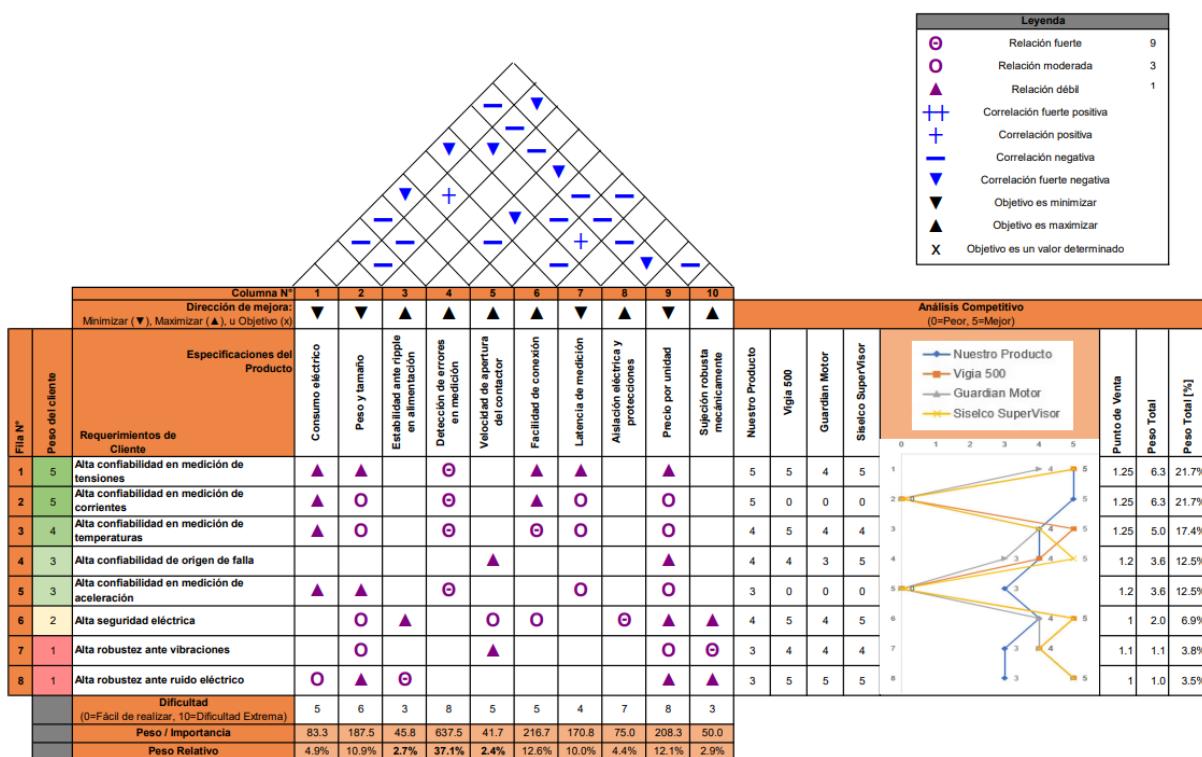


Figura 3.1: Casa de Calidad

Al no existir en el mercado una solución que cumpla con todos los requerimientos del cliente, utilizamos la casa de calidad, que se puede observar en la Figura 3.1, para comparar nuestro producto con productos similares utilizados para la protección de vehículos a combustible, como lo son el Vigia 500, el Guardian Motor y el Siselco Supervisor, para analizar si nuestro producto posee las características principales de productos similares que ya están en el mercado. Los tres sistemas analizados poseen la capacidad de proteger a un vehículo ante tensiones de la batería fuera del rango aceptable, ante falta de aceite o problemas en la presión y ante altas temperaturas del motor, indicando en todos los casos el origen de la falla. Las mediciones necesarias las realizan por distintos métodos por lo que la precisión es varía entre ellos, por ejemplo una medición superficial de temperatura será menos precisa que una interna.

Habiendo estudiando la Casa de Calidad podemos concluir que, si bien en términos generales los productos de mercado son superiores a nuestro producto, teniendo en cuenta solamente lo que le interesa a nuestro cliente, nuestra solución es una alternativa competitiva con un costo mucho menor.

3.1.3. Requerimientos Finales para Trazabilidad

Detalles de escalabilidad:

Cómo se explico anterior, nuestro proyecto de una necesidad particular de nuestro cliente, que se encuentra desarrollando un prototipo de vehículo y debe ser protegido de fallas particulares, tanto por el estado del vehículo como por ser un proyecto con fines académicos. Esto le da un peso relativo bajo a la escalabilidad del producto, se considera que se tendrá un único usuario. Sin embargo, no se descarta que el día de mañana el karting pueda ser utilizado en una competencia de fórmula SAE. La Fórmula SAE (Society of Automotive Engineers) es una competencia internacional en la que equipos de estudiantes universitarios diseñan, construyen y compiten con pequeños autos de carrera estilo fórmula, evaluando tanto el rendimiento del vehículo como la calidad del diseño y el proyecto en su totalidad. De aquí que se puede diseñar un prototipo que cumpla con las normas requeridas para un vehículo de competición, universalizando el producto para que sea útil a otros usuarios más allá del caso específico de nuestro cliente, incluyendo la etapa de desarrollo de los vehículos.

Detalles de acción del producto:

Cómo medida de seguridad ante cualquier falla se deberá acceder al circuito de encendido del karting y desactivar el circuito de encendido, que está diseñado para controlar el funcionamiento del vehículo eléctrico a partir de un interruptor en el volante. Cuando se activa el interruptor, el circuito permite el flujo de corriente y enciende varios relés, los cuales gestionan la distribución de energía a diferentes partes del sistema. En cualquiera de las situaciones críticas que nos informó el cliente que pueden suceder, se debe desactivar el circuito de encendido, lo cual desactivará la alimentación del karting.

Con estos factores tenidos en cuenta, junto con los requerimientos específicos dados por el cliente, y los proyectados a partir de la casa de calidad y la información de la posible competencia, se obtiene la siguiente tabla de requerimientos:

ID	Descripción	Origen
REQ-01	El producto deberá realizar la medición de la tensión del banco de baterías.	Cliente
REQ-02	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas ante valores medidos de tensión del banco de baterías por encima de los 207 V.	Cliente
REQ-03	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas ante la inactividad del bus de comunicaciones CAN durante 1 segundo.	Cliente
REQ-04	El producto deberá realizar la medición de las temperaturas del inverter.	Cliente
REQ-05	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas ante una temperatura del inverter mayor a 120°C.	Cliente
REQ-06	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas ante una temperatura del inverter mayor a 90°C durante al menos 5 segundos.	Cliente
REQ-07	El producto deberá tomar mediciones de corriente a la salida del inverter.	Cliente
REQ-08	El producto deberá activar las medidas de seguridad ante una corriente de salida del inverter mayor a 160A o mayor a 100A por más de 5 segundos.	Cliente
REQ-09	El producto deberá sensar la aceleración del vehículo.	Cliente

REQ-10	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas ante aceleraciones mayores a 1G sobre el eje perpendicular al frente del karting.	Cliente
REQ-11	La medida de seguridad estipulada del sistema de protección debe ser desactivar el circuito de encendido.	Cliente
REQ-12	La alimentación del producto estará provista por un supply de 13,8V, pero deberá tener un back-up de energía propio que dure 15 minutos en caso de que el primero falle.	Cliente
REQ-13	El producto no deberá tener un punto singular de falla, Single Point of Failure (SPoF).	Cliente
REQ-14	El producto deberá tolerar las vibraciones y el ruido eléctrico del karting.	Requerimiento tácito
REQ-15	El producto deberá ser capaz de operar sin problemas en las condiciones climáticas y ambientales a las que estará expuesto el karting tanto en entornos de prueba.	Cliente
REQ-16	El producto deberá ser lo suficientemente pequeño como para ser introducido en una cavidad interior del karting de tamaño 35cm x 35cm x 10cm.	Cliente
REQ-17	El producto deberá proporcionar una indicación visual clara del origen de cualquier falla detectada.	Cliente
REQ-18	El producto deberá actuar sobre el circuito de encendido en caso de detectar una falla, evitando que esta se propague y dañe otras partes del sistema.	Cliente

3.2. Diagrama Funcional de Interfaces

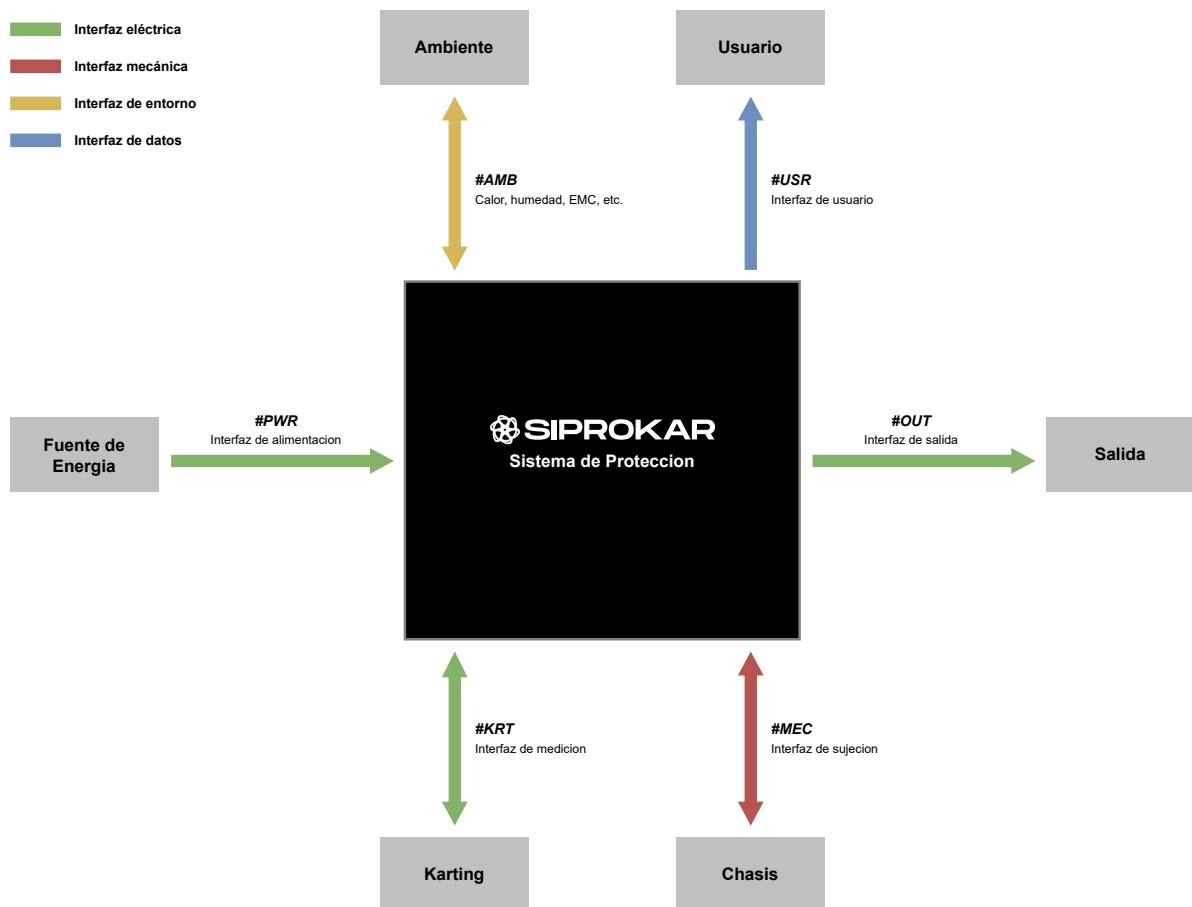


Figura 3.2: Diagrama Funcional de Interfaces

3.3. Especificaciones de Diseño

Leyendas para Especificaciones	
Aplicabilidad	Validacion
P: Prototipo	I: Inspección Visual
	D: Documentación de Diseño
F: Producto Final	S: Simulación
	T: Test

Tabla 3.2: Leyenda de uso en especificaciones

3.3.1. Especificaciones Funcionales

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
			Validación
FUN-OP-01	El producto deberá realizar mediciones cada 50ms.	REQ-01	P, E, I, D, T
FUN-OP-02	El producto deberá medir, procesar e interpretar valores de corriente.	REQ-01 REQ-04	P, E, I, D, T
FUN-OP-03	El producto deberá medir, procesar e interpretar valores de tensión.	REQ-01 REQ-04	P, E, I, D, T
FUN-OP-04	El producto deberá medir, procesar e interpretar valores de temperatura.	REQ-04 REQ-05	P, E, I, D, T
FUN-OP-05	El producto deberá medir, procesar e interpretar valores de aceleración.	REQ-09 REQ-10	P, E, I, D, T
FUN-OP-06	El producto deberá medir, y analizar la actividad del bus CAN	REQ-03	P, E, I, D, T
FUN-OP-07	El producto deberá procesar las mediciones utilizando dos tecnologías distintas y realizar un sistema de votación 2 a 1.	REQ-13	P, E, S, T

Tabla 3.3: Especificaciones Funcionales.

3.3.2. Especificaciones de Interfaz

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
			Validación
INT-PWR-01	El producto deberá ser alimentado con una tensión de entre 12 V y 15 V.	REQ-12	P, E, D, S, T

Tabla 3.4: Especificaciones de Interfaz VIN.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
			Validación
INT-OUT-01	El producto deberá conectarse al circuito de encendido y tener la posibilidad de desconectarlo en caso de detectar una posible falla.	REQ-11	P, F I, S, T

Tabla 3.5: Especificaciones de Interfaz OUT.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-USR-01	El sistema deberá informar qué falla activó el sistema de protección.	REQ-18	P, F I, S, T

Tabla 3.6: Especificaciones de Interfaz USR.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-MEC-01	El producto deberá colocarse en el interior del vehículo, donde no se encuentre expuesto a daños en su integridad.	REQ-16	F I
INT-MEC-02	El producto deberá tolerar vibraciones de hasta 400Hz	REQ-14	P, F D, S, T

Tabla 3.7: Especificaciones de Interfaz MEC.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-KRT-01	El producto deberá medir mediante dos métodos diferentes la tensión del banco de baterías.	REQ-01	P, F I
INT-KRT-02	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la tensión del banco de baterías se encuentre fuera del rango seguro, considerado por encima de 207V.	REQ-02	P, F S, T
INT-KRT-03	El producto deberá medir mediante dos métodos diferentes la corriente a la salida del inverter.	REQ-07	P, F I
INT-KRT-04	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la corriente a la salida del inverter se encuentre fuera el rango seguro, considerado por encima de 160A.	REQ-08	P, F S, T
INT-KRT-05	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la corriente a la salida del inverter se encuentre por encima de 100A por más de 5 segundos.	REQ-06	P, F D, S, T
INT-KRT-06	El producto deberá medir constantemente la tensión sobre el bus CAN y, si no se detecta un flanco luego de 1 segundo del último, se tomarán las medidas de seguridad estipuladas.	REQ-03	P, F D, S, T
INT-KRT-07	El producto deberá medir mediante dos métodos diferentes la temperatura del inverter.	REQ-04	P, F I
INT-KRT-08	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la temperatura del inverter se encuentre fuera del rango seguro, considerado mayor a 120°C.	REQ-05	P, F D, S, T
INT-KRT-09	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la temperatura del inverter sea mayor a 90°C por al menos 5 segundos.	REQ-06	P, F D, S, T
INT-KRT-10	El producto deberá medir mediante dos métodos diferentes la aceleración del karting inverter.	REQ-09	P, F I
INT-KRT-11	El producto deberá tomar las medidas de seguridad estipuladas en caso de que la aceleración del karting sea mayor 1G	REQ-10	P, F D, S, T

Tabla 3.8: Especificaciones de Interfaz KRT.

3.3.3. Especificaciones de Performance

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
PER-POW-01	El producto deberá tener un tiempo de muestreo para todas las mediciones menor a 50 ms.	REQ-18	P,F I, S, T
PER-POW-02	El producto deberá accionar sobre el circuito de encendido 100 ms luego de detectada una falla en el sistema.	REQ-18	P,F I, S, T
PER-POW-03	El producto deberá tener una precisión en las mediciones de tensión de +- 5V.	REQ-01	P, F D, S, T
PER-POW-04	El producto deberá tener una precisión en la medición de corrientes de +- 5A.	REQ-07	P, F D, S, T
PER-POW-05	El producto deberá tener una precisión en la medición de temperaturas de +- 5°C para el inverter.	REQ-04	P, F D, S, T

Tabla 3.9: Especificaciones de Performance.

3.3.4. Especificaciones de Implementación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-AMB-01	El producto deberá operar normalmente para temperaturas entre -5°C y 50°C	REQ-15	P,F D, S, T
IMP-AMB-02	El producto deberá operar normalmente para una presión atmosférica entre 900 hPa y 1050 hPa.	REQ-15	P,F D, S, T

Tabla 3.10: Especificaciones de Operación.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-DIM-01	Sin tener en cuenta los sensores, el producto final deberá entrar cómodamente dentro del karting. Largo <25 cm Ancho <25 cm Alto <10 cm	REQ-16	F, D, T

Tabla 3.11: Especificaciones Dimensionales y de Peso.

3.3.5. Especificaciones de Servicio (RAMS)

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-CON-01	El producto deberá tener un tiempo medio entre fallas mayor a un día.	REQ-13	P,F I

Tabla 3.12: Especificaciones de Confiabilidad.

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-SEG-01	El producto no deberá tener contacto eléctrico con el chasis del karting.	REQ-16	P,F I

Tabla 3.13: Especificaciones de Seguridad.

4. Plan de Validación

4.1. Diseño de Banco de Pruebas

Banco de Pruebas #1		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-01	<p>Se busca testear el rango de TENSIONES DE ALIMENTACIÓN para las cuales el dispositivo debe funcionar.</p> <p>Se conecta a la alimentación del DUT una fuente de tensión variable que tenga una precisión de $\pm 0.1\text{V}$ y que alcance al menos 15V. Se conecta además el pin del bus CAN del DUT a tierra, simulando inactividad en el mismo.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT con dos LEDs (uno para la FPGA y otro para el microcontrolador), para mostrar visualmente el resultado de la prueba.</p>	

Tabla 4.1: Diseño Banco de Pruebas #1

Banco de Pruebas #2		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-02	<p>Se busca testear la detección de TENSIONES anormales, y las medidas de seguridad consecuentes .</p> <p>Se conecta a la entrada una tensión por fuera del rango seguro, utilizando un variac y puente de diodos.</p> <p>Se debe contar con una fuente de alimentación de 13.8V.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT con dos LEDs (uno para la FPGA y otro para el microcontrolador), para mostrar visualmente el resultado de la prueba.</p>	

Tabla 4.2: Diseño Banco de Pruebas #2

Banco de Pruebas #3		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-03	<p>Se busca testear la detección de CORRIENTES anormales, y las consecuentes medidas de seguridad tomadas.</p> <p>Se va a utilizar una fuente de tensión regulable que permita emular la salida de los sensores de corriente, teniendo en cuenta la sensibilidad de cada uno.</p> <p>Se debe contar con una fuente de alimentación de 13.8V.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT con dos LEDs, para mostrar visualmente el resultado de la prueba. A su vez, se conecta un osciloscopio a la salida del DUT o al pin de testeo correspondiente dependiendo de la prueba a realizar.</p>	<pre> graph LR Battery[+] --- 13.8V((13.8V)) 13.8V --- DUT[DUT] DUT --> LED1(LED) DUT --> Out1[] Out1 --> LED2(LED) </pre>

Tabla 4.3: Diseño Banco de Pruebas #3

Banco de Pruebas #4		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-04	<p>Se busca testear la detección de TEMPERATURAS anormales, y las consecuentes medidas de seguridad tomadas.</p> <p>Se debe conectar un sistema regulador de temperatura para de esta forma simular los diferentes valores necesarios. El intervalo de temperatura obligatorio para una correcta evaluación abarca de 0C a 130C.</p> <p>Se conectan los sensores de temperatura del DUT mediante cables/pasta térmica al sistema de regulación de temperatura.</p> <p>Se debe contar con una fuente de alimentación de 13.8V para el DUT.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT conformado por un contactor y un LED, para mostrar visualmente el resultado de la prueba. A su vez, se conecta un osciloscopio a la salida del DUT o al pin de testeo correspondiente dependiendo de la prueba a realizar.</p>	<pre> graph LR Battery[+] --- 13.8V((13.8V)) 13.8V --- DUT[DUT] DUT --> LED1(LED) DUT --> Out1[] </pre>

Tabla 4.4: Diseño Banco de Pruebas #4

Banco de Pruebas #5		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-05	<p>Se busca testear la detección de inactividad del BUS CAN, y las consecuentes medidas de seguridad tomadas.</p> <p>Se conectan dos fuentes de tensión que emular las dos señales diferenciales por las que viaja la comunicación CAN.</p> <p>Se utiliza una fuente de alimentación independiente de 13.8V para el DUT.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT un LED, para mostrar visualmente el resultado de la prueba.</p>	<pre> graph LR V1[] --> DUT[DUT] V2[] --> DUT P[13.8V] --> DUT DUT --> LED[LED] </pre>

Tabla 4.5: Diseño Banco de Pruebas #5

Banco de Pruebas #6		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-06	<p>Se busca testear la detección de ACELE- RACIONES fuera del rango normal, y las consecuentes medidas de seguridad toma- das.</p> <p>Se modifica el DUT a través de modifica- ciones de software para que su límite de peligro sea menor, alrededor de 1G.</p> <p>Se debe contar con una fuente de alimenta- ción de 13.8V para el DUT.</p> <p>Se conecta un circuito a la salida del DUT con dos LEDs, para mostrar visualmente el resultado de la prueba.</p>	<pre> graph LR Accel[3D Acceleration] --> DUT[DUT] P[13.8V] --> DUT DUT --> LED1[LED] DUT --> LED2[LED] </pre>

Tabla 4.6: Diseño Banco de Pruebas #6

Banco de Pruebas #7		
ID	Descripción	Diagrama en Bloques
BP-07	<p>Se busca corroborar las correctas DIMENSIONES y PESO del DUT.</p> <p>Se tiene una caja de 35cm de ancho, 35cm de largo y 10cm de alto, además de una balanza que tenga una precisión de ± 100g y pueda medir un peso de al menos 3kg.</p>	

Tabla 4.7: Diseño Banco de Pruebas #7

4.2. Especificaciones de Tests

Test ID	T-POW-01
Objetivo	Evaluuar que el sistema funciona con un rango de alimentación entre 10V y 15V
Banco de Pruebas	4.1
Precondiciones	Ninguna
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> Conectar la alimentacion del DUT a la fuente de tension. Modular la tensión de la fuente entre 10V y 15V
Criterio	El dispositivo debe mantener prendido los LEDs del circuito de salida en el rango de tensiones especificados.

Test ID	T-BAT-01
Objetivo	Evaluuar el correcto funcionamiento del sistema luego de perder la alimentación principal.
Banco de Pruebas	4.1
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> Conectar la batería de backup al DUT. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. Apagar la fuente de tensión. Cronometrar el tiempo que se mantienen prendidos los LED de encendido del DUT
Criterio	Mantener encendido los LEDs del circuito al menos por 10 minutos.

Test ID	T-TMP-01
---------	----------

Objetivo	Testear que el sistema detecta correctamente valores de temperatura anormales del inverter.
Banco de Pruebas	4.4
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar fuentes de tensión a la salida de los sensores de temperatura que emulen una temperatura de entrada. 3. Variar la tensión de la fuente entre 300mV y 600mV, simulando temperaturas entre los 75°y los 150°.
Criterio	Apagado y encendido de los LEDs de detección de error e indicación de falla en temperatura mediante la interfaz de usuario.

Test ID	T-VLT-01
Objetivo	Evaluar que el sistema detecta de forma correcta valores de tensión anormales en un banco de baterías.
Banco de Pruebas	4.2
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar el variac a la red eléctrica. 3. Conectar el circuito de rectificación al variac. 4. Conectar los sensores de tensión del DUT a la salida del circuito de rectificación. 5. Variar el variac de entre 200V y 220V.
Criterio	Encendido de los LEDs de detección de error e indicación de falla de tensión mediante la interfaz de usuario.

Test ID	T-CUR-01
Objetivo	Evaluar que el sistema detecta de forma correcta valores de corriente fuera del rango de operación de los inverters del karting.
Banco de Pruebas	4.3
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar el generador de señales en los conectores de entrada de los sensores de corriente. 3. Variar la tensión continua del generador entre 1.5V y 2V, simulando corrientes entre 150A y 200A

Criterio	Apagado o encendido de los LEDs detección de error según corresponda (>1.6V encendido, <1.6V apagado) e indicación de falla de corriente mediante la interfaz de usuario.
-----------------	---

Test ID	T-CUR-02
Objetivo	Evaluar que el sistema detecta de forma correcta valores de corriente fuera del rango de operación de los inverters del karting, sin que estos necesariamente lleguen al rango de peligro.
Banco de Pruebas	4.3
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar el generador de señales en los conectores de entrada de los sensores de corriente. 3. Variar la tensión continua del generador entre 900mV y 1.2V, simulando corrientes entre 90A y 120A. 4. Llevar la corriente a un valor mayor a 100A y esperar el tiempo determinado para el cual esto es considerado una falla.
Criterio	Encendido o apagado de los LEDs de detección de error e indicación de falla de corriente mediante la interfaz de usuario.

Test ID	T-ACC-01
Objetivo	Evaluar que el sistema detecta de forma correcta aceleraciones o desaceleraciones abruptas, con fuerzas G mayores al límite determinado.
Banco de Pruebas	4.6
Precondiciones	T-POW-01, T-BAT-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la fuente de tensión de 13.8V a la alimentación del DUT. 2. Mover el DUT de forma abrupta, simulando las aceleraciones y desaceleraciones que sufriría en el karting.
Criterio	Encendido o apagado de los LEDs de detección de error según corresponda e indicación de falla de aceleración mediante la interfaz de usuario. TBDG .

Test ID	T-CAN-01
Objetivo	Evaluar que el sistema detecta de forma correcta la inactividad del bus CAN del karting.
Banco de Pruebas	4.5
Precondiciones	T-POW-01

Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la fuente de 13.8V a la alimentación del DUT. 2. Conectar el generador de funciones a los pines de sensado de bus CAN del DUT y configura una señal que emule actividad según el protocolo CAN. 3. Apagar el generador de funciones, simulando inactividad en el bus CAN. 4. Esperar el tiempo determinado para el cual la inactividad del CAN es considerada una falla.
Criterio	Encendido o apagado del LED de detección de error según corresponda e indicación de falla de bus CAN mediante la interfaz de usuario.

Test ID	T-ERR-01
Objetivo	Evaluar el sistema de votación 2 a 1 del prototipo para detectar una falla de medición de tensión, es decir una discrepancia entre los sistemas de control en la decisión de activar las medidas de seguridad.
Banco de Pruebas	4.2
Precondiciones	T-POW-01, T-VLT-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar el variac a la red eléctrica. 3. Conectar el circuito de rectificación al variac. 4. Conectar uno de los sensores de tensión del DUT a la salida del circuito de rectificación. 5. Conectar una fuente de tensión con su voltaje máximo a la otra entrada de tensión del DUT, simulando una tensión dentro del rango aceptable. 6. Variar el variac de entre 200V y 220V.
Criterio	Encendido o apagado del LED correspondiente al circuito que tiene conectado el variac y del LED correspondiente a la activación del mecanismo de seguridad. Indicación de falla de tensión mediante la interfaz de usuario.

Test ID	T-ERR-01
Objetivo	Evaluar la capacidad del sistema de decidir frente a una indecisión que podría implicar una falla de medición de corriente según uno de los dispositivos.
Banco de Pruebas	4.3
Precondiciones	T-POW-01

Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modificar por software el threshold de detección de error de corriente, permitiendo testear el mecanismo con corrientes menores. 2. Conectar el DUT a la fuente de alimentación de 13.8V. 3. Conectar el sensor de corriente de uno de los sistemas de control a una fuente de corriente A. 4. Conectar el sensor de corriente del otro sistema de control a una fuente de corriente B. 5. Conectar el circuito de salida a los pines de salida correspondientes del DUT. 6. Configurar la fuente A en 1A 7. Aumentar lentamente la fuente B desde 1A hasta 4A
Criterio	Encender o apagar el LED de detección de falla de sistema de control que tiene conectada la fuente de corriente B, manteniendo apagada la detección del otro. Encender o apagar el LED que implica el accionamiento del sistema de protección. Indicar un error de corriente mediante la interfaz de usuario del sistema de protección del sistema de control B.

Test ID	T-ERR-01
Objetivo	Evaluuar la capacidad del sistema de decidir frente a una indecisión que podría implicar una falla de medición de temperatura según uno de los dispositivos.
Banco de Pruebas	4.4
Precondiciones	T-POW-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar el DUT a la fuente de alimentación de 13.8V. 2. Conectar el sensor de temperatura de uno de los sistemas de control el generador de funciones A que simule un valor de temperatura dentro del rango aceptable. 3. Conectar el sensor de corriente del otro dispositivo a el generador de funciones B que varíe entre valores de tensión que simulen temperaturas desde 60°a 130°. 4. Conectar el circuito de salida a los pines de salida correspondientes del DUT.
Criterio	Encender o apagar el LED de detección de error del sistema de control que tiene conectado el generador de funciones B según corresponda, manteniendo apagado el del otro. Encender o apagar el LED que implica el accionamiento del sistema de protección. Indicar un error de corriente mediante la interfaz de usuario del sistema de protección del sistema de control B.

Test ID	T-VEL-01
Objetivo	Evaluuar la velocidad de accionamiento del mecanismo de protección dentro del rango de tiempo necesario.
Banco de Pruebas	4.2

Precondiciones	T-POW-01, T-BAT-01
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conectar la alimentación del DUT a la fuente de tensión de 13.8V. 2. Conectar el variac a la red eléctrica. 3. Conectar el circuito de rectificación al variac. 4. Conectar los sensores de tensión del DUT a la salida del circuito de rectificación. 5. Conectar un canal del osciloscopio en la señal interna de detección de tensión (a través de un pin de testing) para detectar cuando la misma sale por fuera del rango tolerado. 6. Conectar otro canal del osciloscopio en la señal de accionamiento del mecanismo de seguridad. 7. Variar el variac de entre 200V y 220V. 8. Medir el tiempo entre que la señal de tensión se va fuera del rango aceptable y el mecanismo de protección se acciona.
Criterio	El osciloscopio debe mostrar un intervalo de tiempo menor a 100ms entre la salida de la medición de tensión del rango aceptable (Canal 1) y la señal de activación del mecanismo de protección (Canal 2).

Test ID	T-DIM-01
Objetivo	Evaluar las correctas dimensiones del dispositivo
Banco de Pruebas	4.7
Precondiciones	N/A
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tomar el dispositivo y ubicarlo dentro de la caja.
Criterio	El dispositivo se ubico dentro de la caja sin ningún inconveniente.

Test ID	T-DIM-02
Objetivo	Evaluar que el peso del dispositivo sea el adecuado
Banco de Pruebas	4.7
Precondiciones	N/A
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ubicar el dispositivo sobre la balanza.
Criterio	La balanza indique un peso menor a 2Kg

4.3. Validación por documentación

Las siguientes especificaciones serán validadas mediante la documentación del sistema a lo largo del presente informe.

Aspecto	ID del test
MTBF	T-MTBF-01
Velocidad de sampleo	T-SAMP-01
Velocidad de sensado	T-SENS-01

Tabla 4.22: A validar por inspección de la documentación

4.4. Matriz de Trazabilidad de Validación

Origen	REQ ID	ESP ID	TEST ID
Cliente	REQ-01: Medicion tension banco de baterias	FUN-OP-01	D-SMP-01
		PER-POW-01	
		FUN-OP-03	T-VLT-01
		PER-POW-03	
Cliente	REQ-02: Medidas de seguridad banco de baterias	INT-KRT-02	T-VLT-01
Cliente	REQ-03: Medidas de seguridad bus CAN	FUN-OP-01	D-SMP-01
		PER-POW-01	
		FUN-OP-06	T-CAN-01
		INT-KRT-06	
Cliente	REQ-04: Medicion temeperatura inverters	FUN-OP-01	D-SMP-01
		FUN-OP-04	
		PER-POW-01	
		PER-POW-05	T-TMP-01
Cliente	REQ-05: Medidas de seguridad temperatura inverters 120C	INT-KRT-08	T-TMP-01
Cliente	REQ-06: Medidas de seguridad temperatura inverters 90C	INT-KRT-09	T-TMP-02
Cliente	REQ-07: Medicion corriente inverters	FUN-OP-02	T-CUR-01
		FUN-OP-01	D-SMP-01
		PER-POW-01	
		PER-POW-04	T-CUR-01
Cliente	REQ-08: Medidas de seguridad corriente inverters	INT-KRT-04	T-CUR-01
		INT-KRT-05	T-CUR-02
Cliente	REQ-09: Medicion de aceleración	FUN-OP-05	T-ACC-01
		FUN-OP-01	D-SMP-01
		PER-POW-01	
		INT-KRT-11	T-ACC-01

Cliente	REQ-11: Desactivar circuito de encendido	INT-OUT-01	T-VLT-01
Cliente	REQ-12: Alimentación	INT-PWR-01	T-POW-01
Cliente	REQ-13: SPoF	FUN-OP-07	T-ERR-01
		INT-KRT-01	T-ERR-02
		INT-KRT-03	T-ERR-03
		INT-KRT-07	T-ERR-04
		INT-KRT-10	T-ERR-05
		RAM-CON-01	D-MTBF-01
Cliente	REQ-14: Vibraciones y ruido karting	INT-MEC-02	T-MEC-02
Cliente	REQ-15: Ambiental	INT-AMB-01	T-AMB-01
		INT-AMB-02	T-AMB-02
Cliente	REQ-16: Dimensión	INT-MEC-01	T-MEC-01
		RAM-SEG-01	T-MEC-01
Cliente	REQ-17: Interfaz de usuario	INT-USR-01	T-ERR-01
Cliente	REQ-18: Propagación de la falla	INT-OUT-01	T-ERR-02
			T-ERR-03
			T-ERR-04
			T-ERR-05
		PER-POW-02	D-SPD-01

Tabla 4.23: Matriz de trazabilidad

4.5. Plan de Verificación y Validación

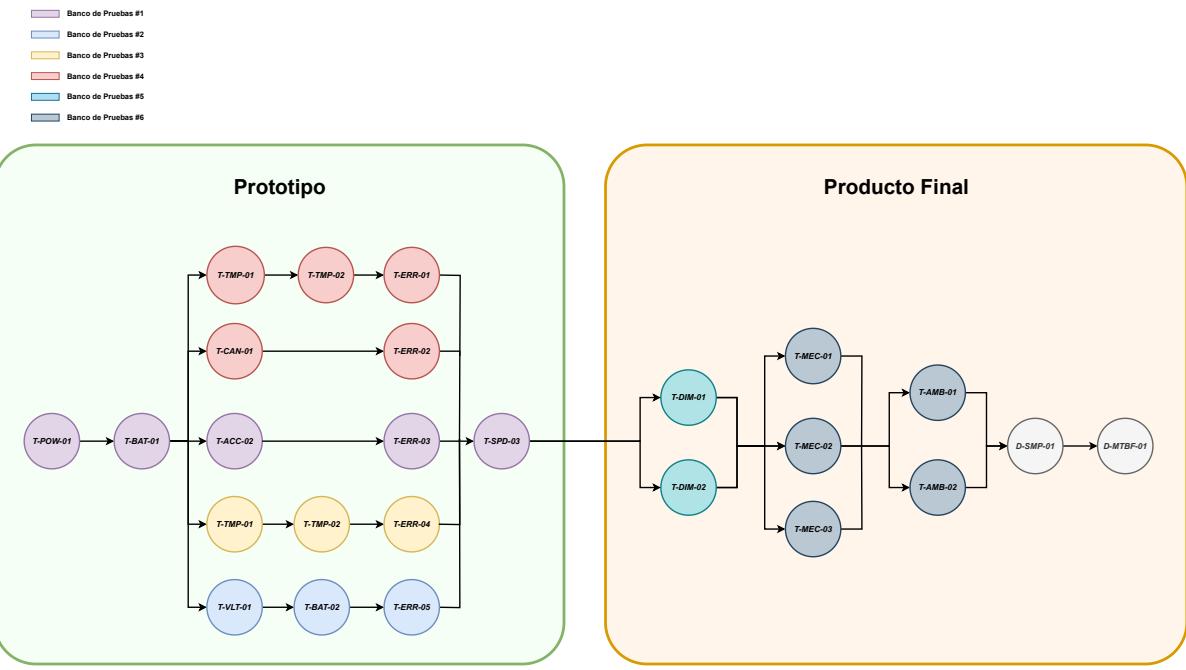


Figura 4.1: Plan de validación

5. Análisis de Factibilidad

En esta sección del informe se llevará a cabo un análisis detallado de la factibilidad del proyecto. Se hará énfasis en la factibilidad tecnológica, temporal, económica y legal, con el propósito de asegurar que el proyecto no solo sea viable académicamente, sino también en términos prácticos y de ejecución.

5.1. Factibilidad Tecnológica

En esta sección se realiza un análisis detallado de la factibilidad tecnológica del proyecto, utilizando un diagrama en bloques para visualizar su estructura. Se evaluarán diversas alternativas de diseño para cada bloque tecnológico, seleccionando la solución más adecuada basada en investigaciones sobre herramientas y tecnologías disponibles, garantizando así el cumplimiento de los requerimientos y especificaciones establecidos previamente.

5.1.1. Esquema Modular

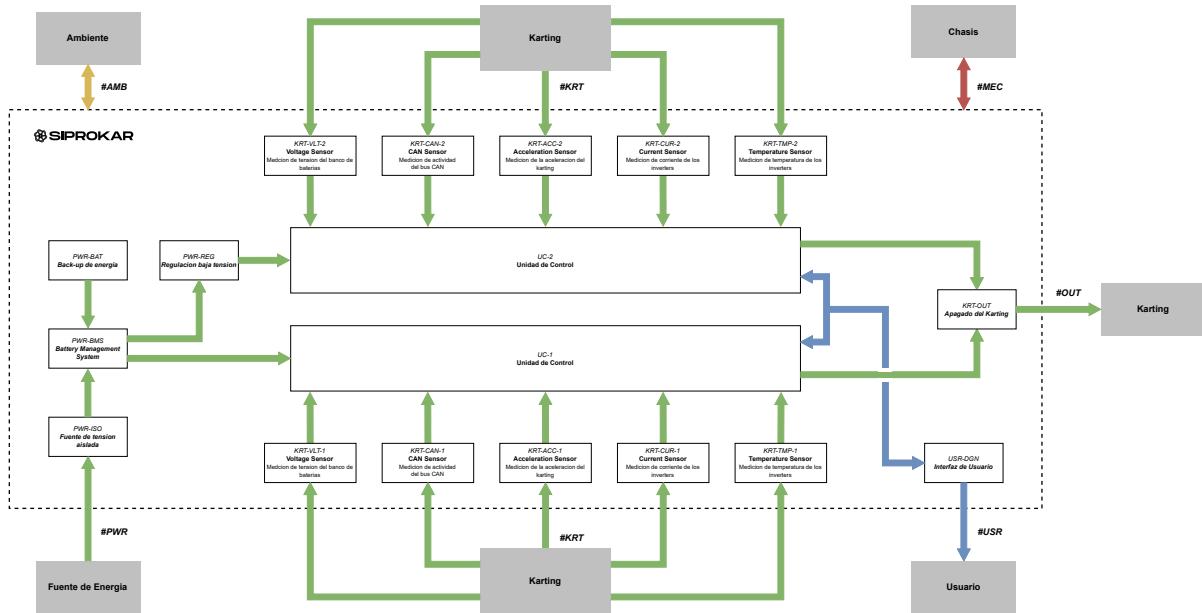


Figura 5.1: Esquema Modular

A continuación se realizará una descripción de cada módulo, sus funcionalidades y posibles implementaciones.

5.1.2. Implementación del modulo UC-1/UC-2

La función de estos dos módulos es procesar las mediciones correspondiente y determinar si el sistema se encuentra operando en los rangos adecuados para cada variable. Buscando minimizar la probabilidad de errores o fallas en el diseño del sistema, buscando así maximizar la probabilidad de detección de fallas en el karting, se decidió utilizar dos procesadores de tecnologías distintas: una FPGA y un microprocesador.

5.1.2.1. Alternativa de diseño

Se exploraron alternativas tanto para la elección de la FPGA como para la elección del microprocesador, buscando una opción off-the-shelf que cumpla con los requerimientos necesarios al menor costo posible. A continuación en las tablas 5.1 y 5.2 se pueden observar las alternativas exploradas y sus distintas características principales.

Característica	FRDM-K64F	ESP32	ARDUINO MEGA
Precio	US \$50	US \$6-10	US \$40
Pines Analógicos	6	18	16
Memoria	1MB Flash 256 KB RAM	4MB Flash 520 KB SRAM	256 KB Flash 8KB SRAM 4KB EEPROM
Velocidad	120 MHz Clock Oscillator	240 MHz Clock Oscillator	16 MHz Clock Oscillator
Experiencia de uso	Si	Si	No
¿El cliente tiene stock?	Si	Si	No

Tabla 5.1: Comparación entre Microprocesadores.

Característica	ICE40UP5K	DE0-Nano
Precio	US \$8,85	US \$69
Pines I/O	39	153 (8 analógicos)
Memoria	1MB RAM 4MB Flash	32MB SDRAM 594 Embedded Memory (KBits)
Velocidad	12 MHz Clock Oscillator	50 MHz Clock Oscillator
Experiencia de uso	Si	Si
¿El cliente tiene stock?	Si	No

Tabla 5.2: Comparación entre FPGAs.

5.1.2.2. Elección de una solución

Luego del análisis, se decidió utilizar para el microprocesador la alternativa ESP32, ya que aunque todas las alternativas cumplían con la mayoría de los requerimientos, esta es la que lo hacía al menor precio y con mayor disponibilidad de stock por parte del cliente.

Además, se decidió utilizar para la FPGA la alternativa ICE40UP5K, porque a pesar de que la alternativa De0-Nano cumplía con creces los requerimientos necesarios (cantidad de pines, velocidad de procesamiento, LUTs utilizadas por el diseño), la ICE40UP5K también lo hacia y a un costo considerablemente menor.

5.1.3. Implementación del modulo PWR-ISO

El módulo PWR-ISO es el encargado de, a partir de una celda del banco de baterías del karting, generar una fuente de alimentación aislada de 5V que luego será utilizada para alimentar el resto de los módulos.

5.1.3.1. Alternativa de diseño

Se exploraron varias alternativas para la implementación de este módulo, buscando una solución que cumpliera con los requerimientos necesarios al menor costo posible. A continuación, en la tabla 5.3 se pueden observar las alternativas exploradas y sus distintas características principales.

Característica	Flyback desde 0	TRACO TMR 2-2411WI	CUI Inc. PYBE20-Q24-S5-T
Costo	Alto	Relativamente bajo	Moderado
Corriente de salida	Personalizable	800 mA máx.	4 A máx.
Tiempo de implementación	Alto	Bajo	Bajo
Simplitud	Baja	Alta	Alta
Cumplimiento de requerimientos	Si	Parcialmente	Totalmente

Tabla 5.3: Comparación entre alternativas para el módulo PWR-ISO.

5.1.3.2. Elección de una solución

Luego del análisis, se decidió utilizar el integrado de CUI Inc. modelo PYBE20-Q24-S5-T, porque aunque todas las alternativas presentaban ciertas ventajas, esta era la que cumplía con todos los requerimientos necesarios. A un costo moderado, ofrecía suficiente corriente de salida (4A máx.) y una solución integrada que nos permitía enfocar nuestro desarrollo en la parte importante de nuestro diseño (las mediciones y el sistema de procesamiento y acción).

5.1.4. Implementación del modulo PWR-BMS

El módulo PWR-BMS (Battery Management System) es el encargado de mantener la batería de backup de alimentación cargada, para que esté lista para utilizarla si por algún motivo (falla del karting, por ejemplo) se pierde la alimentación desde la celda del banco de baterías del karting. Además, debe hacer passthrough de la alimentación proveniente del karting siempre que esta se encuentre funcionando y hacer el switch instantáneo de alimentación desde el karting a la batería de backup en el momento en el que se pierde la alimentación desde el karting.

5.1.4.1. Alternativa de diseño

Se exploraron varias alternativas para la implementación de este módulo, buscando una solución que cumpliera con los requerimientos necesarios al menor costo posible. A continuación, en la tabla 5.4 se pueden observar las alternativas exploradas y sus distintas características principales.

Característica	Desarrollo propio	PowerBoost 1000 (Adafruit)
Costo	Alto	Bajo
Tiempo de implementación	Alto	Bajo
Robustez	Baja	Alta
Simplicidad	Baja	Alta
Cumplimiento de requerimientos	Parcialmente	Totalmente
Respaldo del mercado	No	Sí

Tabla 5.4: Comparación entre alternativas para el módulo PWR-BMS.

5.1.4.2. Elección de una solución

Luego del análisis, se decidió utilizar el módulo integrado PowerBoost 1000 de Adafruit, ya que cumplía con todos los requerimientos previamente mencionados a un bajo costo. Además, ofrecía el respaldo de estar en el mercado desde hace bastante tiempo, lo que significa que ha sido utilizado mucho y mejorado considerablemente, asegurando una solución robusta y confiable.

5.1.5. Implementación del modulo PWR-BAT

El módulo PWR-BAT es la batería que va conectada al módulo PWR-BMS y sirve como backup de alimentación para cuando la alimentación proveniente del karting falla. La elección de la batería fue crucial para asegurar que el sistema pudiera funcionar de manera confiable en caso de una pérdida de alimentación principal.

5.1.5.1. Alternativa de diseño

Se exploraron tres alternativas principales para la implementación de este módulo: baterías de Li-Ion, Li-Po y ultracapacitores, todas con una capacidad de 500mAh o equivalente en el caso de los ultracapacitores. Este valor fue determinado al calcular cuánta energía se necesita para, ante una falla en la alimentación, accionar el circuito de apagado del karting. A continuación, en la tabla 5.5 se pueden observar las características principales de cada alternativa.

Característica	Batería Li-Ion	Batería Li-Po	Ultracapacitores
Capacidad	500 mAh	500 mAh	500 mAh (equivalente)
Densidad de energía	Media	Alta	Alta
Peso	Relativamente ligero	Ligero	Pesado
Durabilidad	Alta	Alta	Muy alta
Costo	Moderado	Moderado	Alto
Seguridad	Alta	Alta	Muy alta
Versatilidad	Media	Alta	Media

Tabla 5.5: Comparación entre baterías Li-Ion, Li-Po y ultracapacitores para el módulo PWR-BAT.

5.1.5.2. Elección de una solución

Luego del análisis, se decidió utilizar una batería de Li-Po. Esta decisión se basó en varias razones: la mayor densidad de energía de las baterías Li-Po permite un tamaño más compacto, lo cual es crucial en el diseño de un karting donde el espacio es limitado. Además, las baterías Li-Po tienen una alta tasa de descarga, lo que asegura que pueden proporcionar rápidamente la energía necesaria para accionar el circuito de apagado en caso de una falla. También, la flexibilidad de forma y tamaño de las baterías Li-Po facilita su integración en el diseño del sistema. Aunque se consideraron los ultracapacitores por su durabilidad y alta densidad de energía, fueron descartados debido a su mayor costo y peso, que no se ajustaban bien a los requisitos del proyecto.

5.1.6. Implementación del módulo PWR-REG

El módulo PWR-REG es responsable de regular la tensión de 5V obtenida a través del PWR-BMS (proveniente de la celda del karting o de la batería de respaldo) a una tensión de 3.3V, necesaria para alimentar ciertos circuitos específicos.

5.1.6.1. Alternativa de diseño

Se evaluaron diversas alternativas para la implementación de este módulo, considerando diferentes reguladores de tensión: un regulador buck BD9F500QUZ, un regulador lineal LM317 y un regulador LDO LM3940. En la tabla 5.6 se presentan las principales características de cada alternativa.

Característica	BD9F500QUZ	LM317	LM3940
Tipo	Buck	Lineal	LDO
Eficiencia	Muy Alta	Media	Alta
Ruido	Alto	Bajo	Bajo
Simplicidad de implementación	Baja	Media	Alta
Pérdidas por ineficiencia	Bajas	Altas	Moderadas

Tabla 5.6: Comparación entre reguladores de tensión para el módulo PWR-REG.

5.1.6.2. Elección de una solución

Después de realizar un análisis exhaustivo, se optó por utilizar el regulador LDO LM3940. Esta decisión se basó en varias consideraciones: siendo un regulador Low Dropout (LDO), las pérdidas por ineficiencia observadas en el LM317 son considerablemente menores, lo cual es beneficioso dado que el circuito se alimenta desde la batería del karting, y se busca minimizar el consumo energético. A pesar de que no posee la eficiencia de un regulador buck, el uso del LM3940 evita el ruido de alta frecuencia generado por el switching del regulador buck, mejorando así la precisión de las mediciones sin necesidad de filtros adicionales. Además, la simplicidad de integración del LM3940, en comparación con la complejidad de implementación de un regulador buck, también favoreció su elección.

5.1.7. Implementación del módulo KRT-TEMP

Este módulo es el encargado de medir la temperatura de los inversores y adaptar dicha señal para que sea recibida por los centros de procesamiento, los cuales determinarán en qué rango de valores se encuentra la misma y si se debe accionar el mecanismo de seguridad.

5.1.7.1. Alternativa de diseño

Se exploraron diversas alternativas para la implementación de este módulo, considerando sensores de temperatura de distintas tecnologías. En la tabla 5.7 se presentan las principales características de cada alternativa.

Característica	PT100	18B20	LM35	NTC Termistor
Tipo de sensor	RTD (Resistance Temperature Detector)	Digital	Analógico	Termistor
Rango de temperatura	-200 a 850 C°	-55 a 125 C°	-55 a 150 C°	-40 a 125 C°
Precisión	Alta	Alta	Media	Media
Linealidad	Alta	Alta	Media	Baja
Facilidad de integración	Media	Alta	Alta	Media
Costo	Alto	Medio	Bajo	Bajo

Tabla 5.7: Comparación entre sensores de temperatura para el módulo KRT-TEMP.

5.1.7.2. Elección de una solución

Luego de un análisis exhaustivo, se decidió utilizar el sensor PT100 y el sensor 18B20. Esta decisión se basó en varias razones: al utilizar tecnologías diferentes, se agrega redundancia ante fallas específicas que puede tener una tecnología de medición. Tanto la PT100 como el 18B20 proporcionan una precisión suficiente y cumplen con nuestros requerimientos. La PT100, siendo un detector de temperatura por resistencia (RTD),

ofrece alta precisión y un amplio rango de temperatura, mientras que el 18B20, siendo un sensor digital, facilita la integración y proporciona datos precisos con una linealidad superior. Esta combinación de sensores asegura una medición fiable y precisa, esencial para la seguridad del karting.

5.1.8. Implementación del módulo KRT-CUR

Este módulo es el encargado de medir la corriente que circula por el inversor del karting (aproximadamente 100 A), adaptarla a una tensión que los centros de procesamiento (microprocesador y FPGA) puedan medir y procesar para luego determinar si es necesario activar el mecanismo de protección.

5.1.8.1. Alternativa de diseño

Se evaluaron varias alternativas para la implementación de este módulo, considerando diferentes métodos de medición de corriente: el uso de un resistor shunt, sensores de efecto Hall y un transformador de corriente. En la tabla 5.8 se presentan las principales características de cada alternativa.

Característica	Resistor Shunt	Sensor de Efecto Hall	Transformador de Corriente
Rango de corriente	Amplio	Amplio	Amplio
Precisión	Alta	Media-Alta	Alta
Aislamiento	No	Sí	Sí
Costo	Bajo	Medio	Medio
Seguridad	Baja	Alta	Alta
Facilidad de implementación	Media	Alta	Media

Tabla 5.8: Comparación entre métodos de medición de corriente para el módulo KRT-CUR.

5.1.8.2. Elección de una solución

Después de realizar un análisis exhaustivo, se decidió utilizar dos sensores de efecto Hall de distintos fabricantes y modos de funcionamiento: el Allegro MicroSystems ACS772 y el Tamura L31S200S05FS. Esta decisión se basó en varias razones: los sensores de efecto Hall proporcionan aislamiento eléctrico, lo que mejora la seguridad del sistema y evita los problemas de seguridad que pueden surgir con los resistores shunt. Además, la combinación de sensores de distintos fabricantes y tecnologías agrega redundancia, aumentando la confiabilidad del sistema. Ambos sensores seleccionados cuentan con una sensibilidad de $10 \frac{\mu V}{A}$, suficiente para detectar correctamente el rango de corrientes que se espera (entre 50 y 200A), asegurando así una medición precisa y segura de la corriente del inversor.

5.1.9. Implementación del módulo KRT-VLT

Este módulo es el encargado de medir la tensión del banco de baterías del karting (equivalente a la tensión del inversor), adaptarla a niveles de tensión que los centros de procesamiento puedan recibir, manteniendo el máximo rango dinámico posible, para que luego estos determinen, según su valor, si el mecanismo de seguridad debe ser activado.

5.1.9.1. Alternativa de diseño

Se evaluaron diversas alternativas para la implementación de este módulo, considerando diferentes métodos de medición de tensión. En la tabla 5.9 se presentan las principales características de cada alternativa.

Característica	Buffer + comparador + optoacoplador	Opamp aislado y ADC	ADC aislado
Precisión	Alta	Alta	Alta
Complejidad	Baja	Media	Media
Componentes especializados	No	Sí (opamp aislado)	Sí (ADC aislado)
Uso de pines	Bajo	Medio	Medio
Costo	Bajo	Medio	Medio
Protocolo de comunicación	No	Sí (I2C, SPI)	Sí (I2C, SPI)

Tabla 5.9: Comparación entre métodos de medición de tensión para el módulo KRT-VLT.

5.1.9.2. Elección de una solución

Después de realizar un análisis exhaustivo, se optó por utilizar un divisor resistivo con un buffer, un comparador que utiliza una referencia de tensión con un diodo zener, y un optoacoplador para aislar y transferir la señal digital a los centros de procesamiento. Esta elección se basó en varias razones: este método permite medir y actuar frente a la tensión con buena precisión utilizando solo un pin, sin necesidad de emplear protocolos de comunicación complejos ni componentes especializados de aislamiento (opamps o ADCs aislados). La simplicidad y efectividad de esta solución la hicieron la opción más adecuada para nuestro diseño. Para agregar redundancia, se implementará una misma topología utilizando diferentes componentes en cada sección de la estructura. Esto garantizará una mayor protección contra fallas sistémicas, ya que los componentes alternativos podrán tomar el relevo en caso de que uno de ellos falle.

5.1.10. Implementación del módulo KRT-ACC

Este módulo es el encargado de medir la aceleración del karting con la finalidad de detectar posibles choques y accionar el mecanismo de protección.

5.1.10.1. Alternativa de diseño

Se evaluaron diversas alternativas para la implementación de este módulo, considerando diferentes acelerómetros. En la tabla 5.10 se presentan las principales características de cada alternativa.

Característica	MPU6050	ADXL345	MMA8451	LIS3DH
Rango de medición	$\pm 2g$ a $\pm 16g$ seleccionable	$\pm 2g$ a $\pm 16g$ seleccionable	$\pm 2g$ a $\pm 8g$ seleccionable	$\pm 2g$ a $\pm 16g$ seleccionable
Precisión	Alta	Alta	Media	Alta
Interfaz	I2C, SPI	I2C, SPI	I2C	I2C, SPI
Consumo de energía	Bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo
Disponibilidad	Alta	Alta	Media	Media
Costo	Bajo	Bajo	Medio	Medio

Tabla 5.10: Comparación entre acelerómetros para el módulo KRT-ACC.

5.1.10.2. Elección de una solución

Después de realizar un análisis exhaustivo, se decidió utilizar los acelerómetros MPU6050 y ADXL345. Esta decisión se basó en varias razones: la disponibilidad en el mercado local y su compatibilidad con los centros

de procesamiento utilizados (microprocesador y FPGA). Ambos acelerómetros ofrecen un rango de medición seleccionable de $\pm 2g$ a $\pm 16g$, lo que proporciona la flexibilidad necesaria para ajustar la sensibilidad según las necesidades del proyecto. Además, ambos cuentan con interfaces I₂C y SPI, lo que facilita su integración con los sistemas existentes. Aunque se consideraron otras alternativas como el MMA8451 y el LIS3DH, estas fueron descartadas debido a su menor disponibilidad en el mercado local y, en el caso del MMA8451, su rango de medición más limitado.

5.1.11. Implementación del módulo KRT-CAN

Este módulo es el encargado de medir la actividad del bus CAN (Controller Area Network) y detectar si hay un periodo prolongado de inactividad, lo que puede indicar un error en el karting y activar el mecanismo de seguridad correspondiente.

Para implementar este módulo, se tuvo en cuenta que las tensiones típicas del bus CAN son 2.5V en ambos pines cuando no hay transmisión, y de 3.75V en el pin positivo y 1.25V en el pin negativo cuando se transmite información. La estrategia de implementación consistió en restar las señales de ambos pines utilizando un restador estándar, específicamente se utilizaron en un caso el LM358AP y en otro el TLV2372. Este enfoque produce una salida de 0V cuando no hay transmisión y 2.5V cuando hay transmisión, dado que los procesadores operan a 3.3V, se utiliza una resistencia de pull up para que cualquier tensión superior a 2.5V se considere un "1" digital, es decir 3.3V y caso contrario 0V.

5.1.11.1. Proceso de implementación

Para lograr esto, se realizó el siguiente procedimiento:

1. **Conexión al bus CAN:** Se conectaron los pines CAN_H y CAN_L a las entradas del restador.
2. **Restador diferencial:** Utilizando un amplificador operacional, se configuró un restador diferencial para obtener la diferencia de voltaje entre CAN_H y CAN_L.
3. **Señal de umbral:** A través de un divisor resistivo utilizando resistencias de precisión del 1 %, se genera una señal de 1.25V que se utilizará como referencia para comparar con la señal proveniente del bus CAN, con el fin de detectar si esta está en un estado alto o bajo.
4. **Comparador y digitalización:** Utilizando amplificadores operacionales se compara la señal diferencial proveniente del bus CAN con la señal umbral como referencial. A la salida se coloca un BJT con una resistencia de pull-up conectada a una tensión de 3,3V. De esta forma, en caso de que la señal diferencial de entrada sea menor a 1.25V, se obtendrá una tensión de 0V. Caso contrario, de 3.3V. Dicho de otra forma, se generó una señal digital que representa el estado del bus CAN.
5. **Detección de inactividad:** Los centros de procesamiento monitorean la señal de salida. Si se detecta un periodo prolongado sin flancos (cambios de 0V a 2.5V y viceversa), se considera que hay inactividad en el bus CAN.
6. **Accionamiento del mecanismo de seguridad:** En caso de detectar inactividad prolongada, los centros de procesamiento activan el mecanismo de seguridad del karting.

5.1.11.2. Ventajas de la implementación

- **Simplicidad:** El uso de los amplificadores LM358AP y TLV2372 como restador diferencial y comparador es una solución simple y eficiente.
- **Compatibilidad:** Utilizando una tensión de referencia muy precisa y una resistencia de pull-up a la salida del comparador se obtiene una señal digital a la entrada de los procesadores compatible con los niveles lógicos que utilizan.
- **Fiabilidad:** Este método permite una detección fiable de la inactividad en el bus CAN, esencial para la seguridad del sistema.

Esta implementación asegura que cualquier inactividad prolongada en el bus CAN sea detectada de manera eficiente, permitiendo actuar rápidamente para mantener la seguridad del karting.

5.1.12. Implementación del módulo KRT-OUT

Este módulo es el encargado de accionar el mecanismo de protección. Si alguno de los centros de procesamiento detecta que alguno de los parámetros medidos puede significar un daño al karting, tiene una conexión directa a este módulo y, al levantar el nivel lógico de esta conexión, este módulo se encarga de entregar la señal necesaria para apagar el karting.

5.1.12.1. Proceso de implementación

Para implementar este módulo, se realizó el siguiente procedimiento:

1. **Conexión a los centros de procesamiento:** Las salidas de cada centro de procesamiento (microprocesador y FPGA) se utilizan como drivers para la base de transistores NPN.
2. **Configuración de los transistores:** Cada transistor está conectado mediante su colector a un relé.
3. **Activación de los relés:** Cuando cualquiera de los centros de procesamiento detecta una condición peligrosa, eleva el nivel lógico de su salida, activando así el transistor correspondiente.
4. **Desconexión de la alimentación:** Al activarse el transistor, el relé correspondiente se energiza y cambia de estado, desconectando los 12V que alimentan al karting y apagándolo.

5.1.12.2. Ventajas de la implementación

- **Simplicidad:** El uso de transistores NPN y relés proporciona una solución simple y efectiva para desconectar la alimentación del karting.
- **Fiabilidad:** La configuración asegura que cualquier señal de los centros de procesamiento pueda apagar el karting, aumentando la seguridad del sistema.
- **Redundancia:** La conexión de múltiples centros de procesamiento proporciona redundancia, asegurando que el karting se apague si cualquiera de ellos detecta una condición peligrosa.

Esta implementación asegura que el mecanismo de protección del karting se accione de manera eficiente y confiable en caso de detectar parámetros fuera de los límites seguros.

5.1.13. Implementación del módulo USR-DGN

Este módulo es el encargado de funcionar como interfaz de usuario, mostrando si hubo un error en el karting. El módulo fue desarrollado utilizando cuatro LEDs rojos para cada centro de procesamiento. Al apagarse el karting mediante el mecanismo de protección, los centros de procesamiento que detectaron la falla encienden el LED rojo correspondiente (el primer LED corresponde a corriente, el segundo a tensión, el tercero a temperatura, el cuarto a CAN y si todos están apagados, corresponde a aceleración). Estos LEDs se mantienen encendidos utilizando la batería de respaldo.

5.1.13.1. Proceso de implementación

Para implementar este módulo, se siguieron los siguientes pasos:

1. **Conexión a los centros de procesamiento:** Cada centro de procesamiento (microprocesador y FPGA) tiene salidas conectadas a los LEDs correspondientes.
2. **Asignación de LEDs:** Se asignaron cuatro LEDs rojos para cada centro de procesamiento, cada uno indicando un tipo de error diferente:
 - Primer LED: Error de corriente.
 - Segundo LED: Error de tensión.
 - Tercer LED: Error de temperatura.
 - Cuarto LED: Error de CAN.
 - Todos los LEDs apagados: Error de aceleración.

3. **Activación de LEDs:** Cuando se detecta un error que requiere la activación del mecanismo de protección, el centro de procesamiento correspondiente enciende el LED asignado al tipo de error detectado.
4. **Alimentación de los LEDs:** Los LEDs se mantienen encendidos utilizando la batería de respaldo, garantizando que la indicación de error permanezca visible incluso después de que el karting se haya apagado.

5.1.13.2. Ventajas de la implementación

- **Claridad:** La utilización de LEDs rojos permite una indicación clara y visible de los errores detectados en el karting.
- **Simplicidad:** El diseño con LEDs es simple y fácil de entender para el usuario, proporcionando una interfaz de usuario efectiva.
- **Fiabilidad:** El uso de la batería de respaldo asegura que la indicación de error se mantenga activa, facilitando la identificación de problemas incluso después de un apagado del sistema.

Esta implementación asegura una comunicación clara y fiable de los errores al usuario, permitiendo una rápida identificación y resolución de problemas en el karting.

5.1.14. DFMEA

Design FMEA							
Item and Function/ Requirements	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	Severity	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	Occurrence	Current Controls - Prevention	Current Controls -Detection
1 Sensor de Corriente, Tensión y Temperatura	El sensor se quema o se desconecta	Pérdida de redundancia y activación del sistema de protección.	3	Sobrecorriente o sobretensión a causa de fallas en los sistemas medidos, incorrecta colocación del sensor.	2	Elección de sensor con alta tolerancia a picos de corriente y de tensión, diseño con protección, instructivo de colocación.	Redundancia en la medición (dos sensores)
2 Sensores de Aceleración	El sensor se quema, se desconecta o se descalibra	Pérdida de redundancia y activación del sistema de protección.	3	Sobrecorriente o sobretensión de alimentación del acelerómetro, incorrecta colocación del sensor, mala calibración	2	Elección de sensor con alta tolerancia a picos de corriente, diseño con protección, instructivo de colocación, calibración con pruebas.	Redundancia en la medición (dos sensores)
3 Conexion de alimentacion	Desconexión del conector	Desactivación del circuito luego de quedarse sin batería	4	Mala conexión por causa del usuario - choque ligero	1	Diseño con conector sujetado al karting	Inspección
4 FPGA/Microcontrolador	Error en el código genera que la ejecución del mismo se interrumpe	Activación innecesaria del sistema de protección - Potencial error en la redundancia	3	Código sin debugging extensivo	2	Testeos de control de calidad del software con simulaciones del sistema	Ninguna
5 Microcontrolador	Error por inversión de bits de memoria que interrumpe la ejecución correcta del algoritmo	Activación innecesaria del sistema de protección - Potencial error en la redundancia	3	Falla aleatoria no predecible	1	Ninguna	Ninguna
6 Carcasa	La carcasa se desacopla del karting y queda suelta dentro del mismo	Destrucción del sistema de protección, falla crítica	5	Mala sujeción al chassis del karting, choque severo	1	Sujeción mecánica robusta con tornillos al chassis del karting	Inspección visual

Detectabilidad	Severidad	Probabilidad	Criterios de Aceptación (RPN)
Completa	Insignificante	Remota	Aceptable < 14
Mayor	Poco significativo	Poco probable	Bajar hasta razonablemente práctico Entre 14 y 28
Moderada	Moderado	Media	No aceptable > 28
Pequeña	Grave	Alta	
Mínima	Muy grave	Muy alta	

Figura 5.2: DFMEA

5.2. Factibilidad de Tiempos

La tabla 5.11 contiene una lista detallada de las actividades necesarias para llevar el proyecto a cabo, junto con las actividades predecesoras, es decir, aquellas que deben completarse antes de avanzar a la siguiente etapa del proyecto. La tabla incluye tres estimaciones de duración para cada actividad: optimista, esperada y pesimista. La duración esperada se calculó bajo el supuesto de que los tres miembros del grupo trabajen aproximadamente 8 horas semanales. Dependiendo de la actividad, se ha estimado una duración optimista y pesimista para reflejar posibles variaciones en el tiempo necesario para completar cada tarea. Además, se ha

calculado el desvío estándar de cada actividad, proporcionando una medida de la variabilidad esperada en la duración de las tareas.

Selección de Componentes Principales	Duración Optimista (Semanas)	Duración Esperada (Semanas)	Duración Pesimista (Semanas)	Desvío Estandar (semanas)	Actividades Precedentes
Definición de Problemas y Objetivos	3	4	5	1	-
Acuerdo de Requerimientos con el Cliente	3	4	5	1	Definición de Problemas y Objetivos
Definición de Especificaciones	2,5	3	3,5	0,5	Acuerdo de Requerimientos con el Cliente
Alternativas de Diseño	2	3	4	1	Definición de Especificaciones
Descripción de Módulos	1	2	3	1	Alternativas de Diseño
Factibilidad Económica	1	2	3	1	Descripción de Módulos
Selección de Componentes Principales	1	2	3	1	Factibilidad Económica
Cálculo de Elementos Circuitales	2	3	5	1,5	Selección de Componentes Principales
Diagrama de Estados	0,5	1	1,5	0,5	Selección de Componentes Principales
Adquisición de Componentes	2	4	5	2	Cálculo de Elementos Circuitales
Simulación de Hardware	1	2	3	1	Adquisición de Componentes
Diseño de Circuitos Impresos	2	4	5	1,5	Simulación de Hardware
Construcción del Prototipo	2	3	5	1,5	Diseño de Circuitos Impresos
Definición de Subrutinas del Microcontrolador	0,5	1	1,5	0,5	Diagrama de Estados
Definición de Subrutinas de la FPGA	0,5	1	1,5	0,5	Diagrama de Estados
Programación Microcontrolador	1	2	3	1	Definición de Subrutinas del Microcontrolador
Programación FPGA	1	2	3	1	Definición de Subrutinas de la FPGA
Tests/Debug Software	2	3	4	1	Programación Microcontrolador, Programación FPGA
Pruebas	2	4	6	2	Construcción del Prototipo, Tests/Debug Software
Estudio Confiabilidad	1	2	3	1	Pruebas
Ánáisis de Resultados y Correcciones	2	3	4	1	Estudio Confiabilidad
Finalización de Documentación	2	4	6	2	Ánáisis de Resultados y Correcciones

Tabla 5.11: Tabla de actividades para el desarrollo del proyecto.

A partir de la detallada tabla de actividades, se ha procedido a la generación de un diagrama de PERT (Program Evaluation and Review Technique) que se puede observar en la Figura 5.3. Este diagrama permite visualizar de manera más clara y eficiente la secuencia y la interdependencia de cada una de las actividades del proyecto.

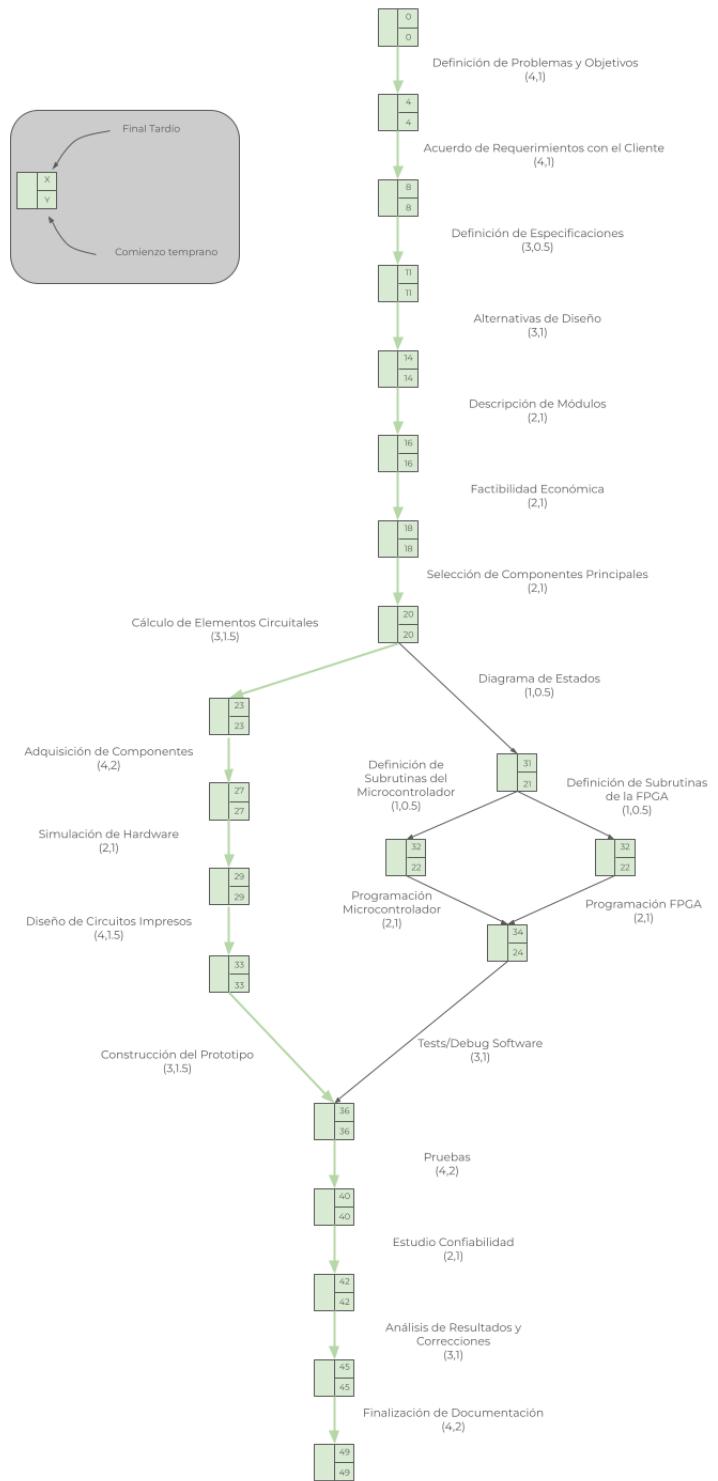


Figura 5.3: Diagrama PERT ideal.

En el diagrama de la Figura 5.3 se pueden observar cada una de las actividades que hacen a la totalidad del proyecto y se señala particularmente el camino crítico, es decir, la secuencia más larga de actividades

interdependientes que deben completarse para finalizar un proyecto en el menor tiempo posible. A partir de este diagrama, podemos concluir que la duración esperada del proyecto es de **49 semanas**, suponiendo que los tres miembros del equipo trabajen aproximadamente ocho horas a la semana. Considerando los posibles imprevistos, es posible que se requiera ajustar las horas de trabajo semanal. Por lo tanto, utilizando los tiempos optimistas y pesimistas, se estimó la variación por actividad. Al observar el camino crítico, podemos concluir que habrá un desvío estándar total de **22 semanas**.

Hasta ahora en el análisis no se han considerado los períodos prolongados en los que el proyecto estuvo detenido. A continuación se detalla una lista de las principales demoras y la duración de cada una:

- En el 2022 se utilizan los meses de Mayo, Julio, Septiembre, Noviembre y Diciembre íntegramente para atender nuestros exámenes parciales y finales.
- En el 2023, desde Enero hasta Agosto se puso en pausa el proyecto para finalizar el cursado de materias y exámenes finales.
- Durante el 2024, desde Enero hasta Marzo se trabaja intermitentemente en el proyecto ya que los tres miembros debimos atender a distintos compromisos laborales.

A partir de esta información se generan los diagramas de Gantt que se observan en las Figuras 5.4 y 5.5.



Figura 5.4: Diagrama de Gantt del proyecto asumiendo un trabajo continuo que comienza en marzo de 2022.

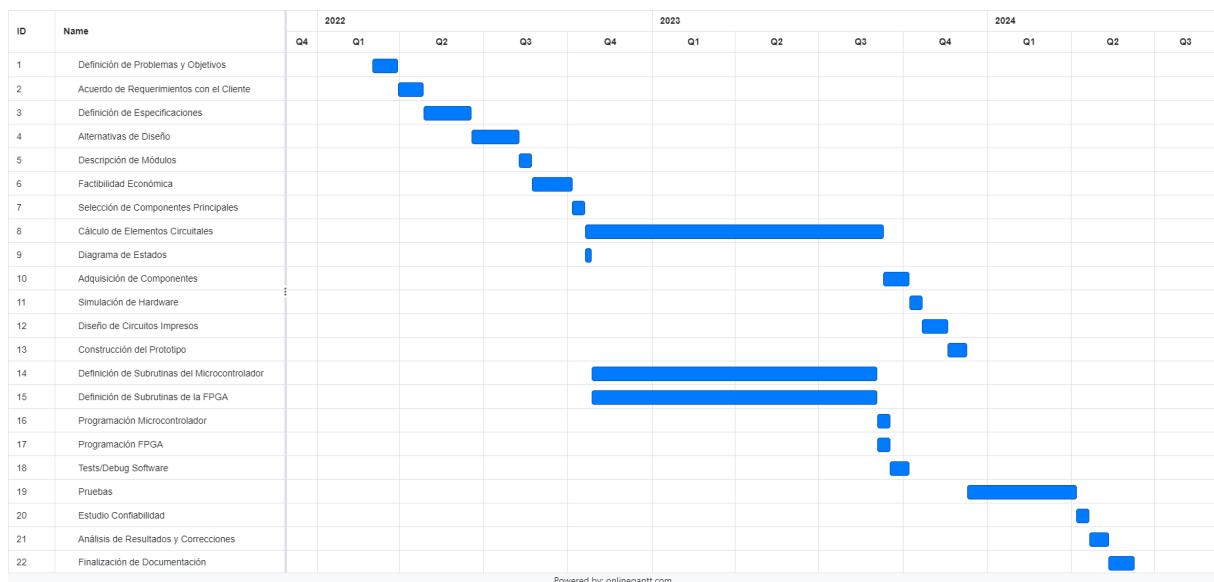


Figura 5.5: Diagrama de Gantt considerando retrasos causados por exámenes y compromisos laborales.

A partir de todo este análisis se obtienen las siguientes conclusiones respecto a la factibilidad temporal del proyecto:

- Sin tener en cuenta retrasos de índole laboral y/o académica, el proyecto debería haber sido concluido a más tardar en Julio del 2023, teniendo las duración pesimistas para cada actividades del proyecto.
- Introduciendo los retrasos antes mencionados, la finalización del proyecto se pospone un año, teniendo en cuenta las duraciones esperadas de cada actividad. En caso de que se trabajé más de 8 horas por semanas, se podría lograr con únicamente 6 meses de retraso.
- Teniendo en cuenta retrasos académicos y laborales y que se tiene un desvío estándar de 22 semanas, en el peor caso la finalización del proyecto sería en el tercer cuatrimestre del 2024.

5.3. Factibilidad Económica (Mercado, costos, ciclo de vida, VAN, TIR)

5.3.1. Modelo de negocios

Es importante tener en consideración que el objetivo principal del proyecto no es llevar el producto desarrollado al mercado. La finalidad del diseño es brindarle a un cliente en particular el equipo especificado. Sin embargo, se llevará adelante el análisis económico del proyecto tomando como referencia un modelo tradicional donde el producto será fabricado por nosotros, y luego vendido vía Internet a los países desarrollados donde el mercado es más amplio y fructífero. A pesar de que no se busca que el proyecto sea rentable, el análisis permitirá observar la viabilidad económica del mismo si se decidiera masificar el producto y entrar al mercado.

5.3.2. Mercado

Teniendo en cuenta la situación económica actual argentina, como así también la poca expansión de los autos eléctricos en el territorio no sería rentable tomar solamente el mercado nacional, ya que la demanda sería aproximadamente inexistente. Por lo tanto se decidió expandir la investigación al ámbito internacional. Hay que tener en cuenta que el mercado será pequeño en relación a la población actual que utilizan autos eléctricos, esto se debe a que el producto fue diseñado para un cliente particular cuyo vehículo eléctrico es utilizado para competencias amateurs.

El mercado principal será el de los autos eléctricos amateurs, más inclinado al área universitaria debido a la gran cantidad de competencias nacionales e internacionales que se llevan adelante. La Formula SAE y la Formula

Students son las competencias mas conocidas, la primer cuenta con aproximadamente 30 equipos anualmente, mientras que la segunda puede llegar a reunir hasta 70 equipos anualmente. En conjunto se tienen anualmente 100 universidades en desarrollo de vehículos eléctricos, sin embargo en un contexto mas laxo, es decir sin estar inscriptos en competiciones, se encuentran registrados aproximadamente 400 universidades.

En el mundo hay alrededor de 30 mil universidades por lo tanto se debe tener en cuenta que no todas las universidades se encuentran inscriptas en estas competencia, es decir el mercado disponible sera algo mayor a lo estipulado anteriormente.

5.3.3. Costos

5.3.3.1. Inversión Inicial

En una primera instancia se tuvo en consideración la inversión inicial necesaria para poner en desarrollo el proyecto. La sección cuenta principalmente con los bienes inmuebles imprescindibles para construir el proyecto y realizar sus pruebas de validación.

Inversión Inicial			
Material	Costo por unidad (USD)	Unidades	Costo total
Mesa de trabajo	\$ 55	6	\$ 330
Estación de soldado	\$ 50	4	\$ 200
Multimetros	\$ 25	4	\$ 100
Osciloscopio	\$ 293	3	\$ 879
Fuente	\$ 77	3	\$ 231
Caja de herramientas	\$ 25	4	\$ 100
Computadoras	\$ 800	4	\$ 3.200
Campaña de marketing	\$ 400	1	\$ 400
TOTAL			\$ 5.440

Tabla 5.12: Inversion Inicial

5.3.3.2. Costos Fijos

En esta sección del análisis económico del proyecto, se llevará a cabo un examen detallado de los costos fijos asociados. Estos incluyen gastos como el alquiler de oficinas, servicios públicos, salarios del personal administrativo, costos de marketing y otros gastos que no varían significativamente en relación con la producción o el nivel de actividad del proyecto.

En la siguiente tabla 5.13 se presenta el desglose de todos los costos fijos considerados. El cálculo de los sueldos puede ser revisado en detalle en la siguiente sección.

Costos Fijos			
Detalle	Costo por unidad (U\$D)	Unidades	Costo total (U\$D)
Alquiler	\$500	1	\$500
Telefonía e Internet	\$50	1	\$50
Agua	\$20	1	\$20
Electricidad	\$100	1	\$100
Sueldo	\$13.472	1	\$13.472
TOTAL			\$14.142

Tabla 5.13: Costos Fijos

5.3.3.2.1. Sueldos

Se ha realizado un análisis exhaustivo de las grandes empresas del mercado argentino para determinar el salario estimado de un ingeniero junior en Argentina. Según los datos recopilados, el salario promedio aproximado es de U\$D 1300 por mes. Este análisis proporciona una base sólida para comprender y proyectar los costos asociados con el personal técnico en el contexto específico del proyecto.

En la tabla 5.14 se encuentran los aportes que el empleador debe realizar por sobre e sueldo del empleado.

Aportes		
Contribuciones	Porcentaje	Valor (U\$D)
Jubilación	16 %	\$208
PAMI	2 %	\$26
Obra Social	6 %	\$78
Fondo Nacional de Empleo	1.5 %	\$19.5
Seguro de Vida Obligatorio	0.02 %	\$0,2
ART	4 %	\$52
TOTAL	29.5 %	\$383,5

Tabla 5.14: Aportes

Finalmente, el costo de un ingeniero junior en Argentina será aproximadamente de U\$D 1684 por mes. Suponiendo el mismo sueldo para el resto del personal, se estima que será necesario contar con tres ingenieros para el desarrollo y armado del proyecto, así como con 3 técnicos para ayudar en el ensamblado, validación y prueba de los módulos. Además, se contratarán dos personas especializadas en el ámbito administrativo. En la tabla 5.15 se podrá observar el costo final.

Costo Mano de Obra			
Profesiones	Costo por unidad (U\$D)	Unidades	Costo total (U\$D)
Ingeniero	\$1684	3	\$5.052
Técnicos	\$1684	3	\$5.052
Personal Administrativo	\$1684	2	\$3.386
TOTAL			\$13.472

Tabla 5.15: Costo Mano de Obra

5.3.3.3. Costos Variables

En esta sección se abordarán los costos variables del proyecto, que incluyen todos los componentes utilizados en la fabricación del producto, así como los gastos asociados con el envío y embalaje. Estos costos fluctúan en relación con la cantidad producida y vendida, desempeñando un papel crucial en la determinación de la estructura de costos total del proyecto.

Es importante destacar que el análisis realizado es una aproximación. Se basa en datos y supuestos disponibles hasta el momento, con el fin de estimar los costos variables del proyecto. Dado que estos costos pueden variar según diferentes factores como la fluctuación de precios de materias primas, cambios en los costos de envío y embalaje, entre otros.

Costos Variables			
Detalle	Costo por unidad (U\$D)	Unidades	Costo total (U\$D)
Modulo de Alimentacion	\$60	1	\$60
Modulo de Control	\$40	1	\$40
Modulo Sensor de Corriente	\$30	2	\$60
Modulo Sensor de Tension	\$5	2	\$10
Modulo Sensor de Temperatura	\$20	2	\$40
Module Sensor bus CAN	\$5	2	\$10
Acelerometros	\$20	2	\$40
Interfaz de Usuario	\$10	1	\$10
Circuito de Salida	\$10	1	\$10
Envio	\$10	1	\$10
TOTAL			\$290

Tabla 5.16: Costos Variables

5.3.4. Ingresos

El precio de venta del producto se determinó con el objetivo de alcanzar un margen de ganancia del 50% sobre el costo de producción de U\$D 290. Este margen fue elegido considerando los costos operativos, inversión en desarrollo y expectativas de rentabilidad. Posteriormente, se ajustará el precio de venta para incluir el IVA del 21%, llegando a un precio final de U\$D 530.

Precio por Unidad	
Producto	Valor (U\$D)
Sistema de Proteccion	\$530

Tabla 5.17: Precio del producto

En esta subsección se llevara adelante una proyección de las unidades vendidas del producto. Se tomara como punto máximo 410 unidades, en base a este máximo y a la curva del ciclo de vida de un producto es posible estimar el numero de unidades vendida en cada trimestre. En la tabla 5.18 se encuentran las aproximaciones realizadas.

Ventas Trimestrales		
Periodo	Unidades	Ingresos (U\$D)
1	50	\$ 26.500
2	120	\$ 63.600
3	270	\$ 143.100
4	300	\$ 159.000
5	410	\$ 217.300
6	300	\$ 159.000
7	260	\$ 137.800
8	185	\$ 98.050

Tabla 5.18: Ingresos trimestrales

Una vez definido tanto lo costos como los ingresos a obtener, se realiza el cuadro de resultados operativos del proyecto, con una proyección a 2 años, el cual puede ser observado en la tabla 5.19. Se tomo un alícuota del 35% para el impuesto a las ganancias.

Cuadro Resultado FEO								
Trimestre	1	2	3	4	5	6	7	8
Ventas	\$ 26.500	\$ 63.600	\$ 143.100	\$ 159.000	\$ 217.300	\$ 159.000	\$ 137.800	\$ 98.050
Costos Fijos	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426	\$ 42.426
Costos Variables	\$ 14.500	\$ 34.800	\$ 78.300	\$ 87.000	\$ 118.900	\$ 87.000	\$ 75.400	\$ 53.650
Amortizaciones	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
UAIG	-\$ 30.426	-\$ 13.626	\$ 22.374	\$ 29.574	\$ 55.974	\$ 29.574	\$ 19.974	\$ 1.974
IG	-\$ 10.649	-\$ 4.769	\$ 7.831	\$ 10.351	\$ 19.591	\$ 10.351	\$ 6.991	\$.691
UN	-\$ 19.777	-\$ 8.857	\$ 14.543	\$ 19.223	\$ 36.383	\$ 19.223	\$ 12.983	\$ 1.283

Tabla 5.19: Flujo de fondos operativos

Se puede observar la ausencia de las amortizaciones ya que en ningún momento se realizaron inversiones en bienes de uso. Esto también tendrá una consecuencia a la hora de calcular el flujo de fondos, debido a que no se

verá un movimiento de fondos extraordinarios, es decir que el flujo de fondos netos solo se verá afectado por los movimientos de fondos operativos. En la tabla 5.20 se encuentra el resumen del flujo de fondos de los próximos 2 años.

Cuadro Resultado FNN									
Trimestre	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Inversion	\$ 5.440.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
FEO	\$ -	-\$ 19.777	-\$ 8.857	\$ 14.543	\$ 19.223	\$ 36.383	\$ 19.223	\$ 12.983	\$ 1.283
FEE	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
FFN	-\$ 5.440	-\$ 19.777	-\$ 8.857	\$ 14.543	\$ 19.223	\$ 36.383	\$ 19.223	\$ 12.983	\$ 1.283
FFN Real	-\$ 5.440	-\$ 17.197	-\$ 6.697.09	\$ 9.562.32	\$ 10.991	\$ 18.089	\$ 8.311	\$ 4.880	\$ 419.45

Tabla 5.20: Flujo de fondos netos

5.3.5. VAN y TIR

Finalmente, para conocer la viabilidad económica del proyecto se sacaron los valores de VAN y TIR del mismo. Para el cálculo del VAN se tomó una tasa de descuento la tasa de interés nominal anual de un plazo fijo en dólares, generalmente las mismas se encuentran entre el 0,5% y el 1,75% anual, en este caso se tomó una tasa del 4% para estar seguros. En la tabla 5.21 se pueden observar los valores obtenidos.

Indicadores del Proyecto	
VAN (Valor Actual Neto)	TIR (Tasa Interna de Retorno)
U\$D 44.201	34,61 %

Tabla 5.21: Indicadores VAN y TIR

5.4. Factibilidad Legal y Responsabilidad Civil (Regulaciones y licencias)

5.4.1. Responsabilidad Civil

Las Sociedades Anónimas (SA) y las Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL) representan dos opciones distintas para la organización empresarial en Argentina, cada una con características específicas que afectan la estructura y operación de la empresa.

En términos de cantidad de socios, una SA requiere un mínimo de dos accionistas, mientras que una SRL puede ser constituida por uno solo y hasta un máximo de cincuenta socios.

En cuanto a impuestos, ambas están sujetas al impuesto a las Ganancias, pero la SA también debe pagar el Impuesto a la Distribución de Dividendos (IDD), lo cual es una consideración importante en la planificación fiscal.

En cuanto a los órganos obligatorios, una SA debe tener un directorio compuesto por al menos tres miembros, incluyendo presidente, vicepresidente y síndicos, mientras que una SRL no tiene un órgano de dirección obligatorio y puede ser administrada por uno o más socios.

En relación con el capital social, una SA divide su capital en acciones, sin un mínimo legal establecido, mientras que una SRL divide su capital en cuotas, sin un mínimo legal específico, pero se recomienda tener un capital inicial adecuado para la operación.

En términos de burocracia y formalidades, las SA tienen más requisitos administrativos, como la celebración de asambleas de accionistas anuales y la presentación de estados financieros auditados, mientras que las SRL tienen menos formalidades y requerimientos administrativos.

Ambas formas jurídicas ofrecen responsabilidad limitada, lo que significa que los socios no responden personalmente por las deudas y obligaciones de la empresa más allá de sus aportes.

Dada la naturaleza del proyecto de desarrollo de un sistema de protección para un karting eléctrico, la Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) se presenta como la opción más adecuada. La flexibilidad en la gestión y la administración simplificada permiten a los emprendedores concentrarse en la innovación y la comercialización del producto sin las rigurosas formalidades requeridas por una SA. Además, la responsabilidad limitada proporcionada por la SRL protege el patrimonio personal de los socios frente a posibles riesgos asociados con el desarrollo y la comercialización de productos tecnológicos. Esto es crucial para mantener la seguridad financiera de los emprendedores mientras exploran oportunidades de crecimiento y expansión en el mercado de karting eléctrico.

6. Ingeniería de Detalle

6.1. Hardware

6.1.1. Diagrama en Bloques (Hardware)

En la figura 6.1 se puede observar el diagrama en bloques de alto nivel de hardware. El modulo de procesamiento se encuentra conformado por un microcontrolador y una FPGA, este recibe y procesa la información proveniente de los sensores para luego actuar de forma adecuada sobre el circuito de encendido.

Todos los módulos de sensores, además del circuito de medición, cuentan con un sistema de acondicionamiento de la señal, para eliminar ruido y amplificar la señal.

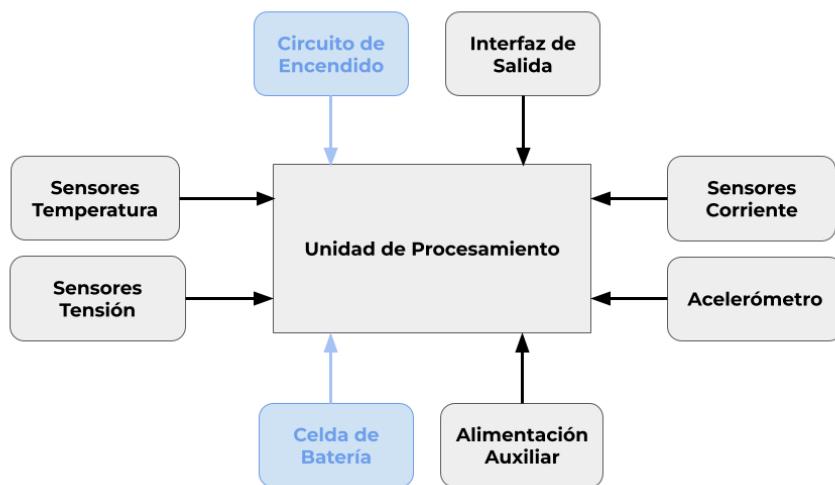


Figura 6.1: Diagrama en bloques de hardware

En color gris se encuentran todos los módulos que integran el proyecto. Por otro lado, en color azul se encuentran todos los módulos externos con los que el hardware interactúa.

6.1.2. Descripción detallada de cada bloque

6.1.2.1. Unidad de Control

La unidad de procesamiento se encarga principalmente de recibir y procesar la información enviada por los sensores, para luego tomar una decisión.

La lógica principal se lleva adelante por una dos procesadores diferentes. Por un lado una FPGA y por el otro una ESP32.

6.1.2.2. Sensores de temperatura

El sistema presenta dos formas de medir la temperatura es decir dos circuitos diferentes. En una primera instancia se utiliza una **PT100**, una resistencia variable por temperatura. La misma sera ubicada dentro de un puente de Wheatstone para una mejor precisión y una mayor sensibilidad. Todas las resistencias serán de presión 1% para disminuir el margen de error en la medición. Luego la medición pasara por un amplificador de instrumentación para eliminar el ruido de modo común en la señal y amplificara para una mejor lectura. Finalmente, la señal entrara a un comparador para verificar que no haya superado los límites establecidos, la tensión de referencia sera realizada nuevamente mediante resistencias de 1% para tener una mayor precisión.

En la figura 6.2 se puede observar el diagrama en bloques del modulo. Es importante destacar que el circuito sera replicado con valores diferentes dependiendo de la temperatura a sensar.

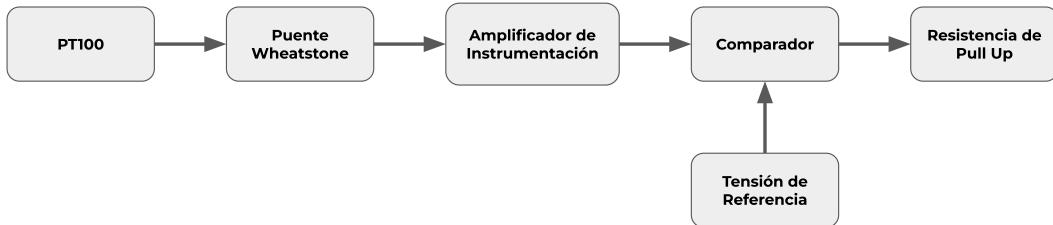


Figura 6.2: Diagrama en bloques modulo de temperatura

Como segundo método de medición se utiliza un sensor digital de temperatura **18B20**, que posee una resolución de hasta 12 bits. La salida digital del sensor se conecta directamente a las entradas de los procesadores. Por lo tanto no es necesario realizar ningún acondicionamiento de la señal ni agregar un nuevo ADC.

6.1.2.3. Sensores de tensión

En primer lugar, trabajando para medir la tensión de las baterías y teniendo en cuenta que se busca detectar tensiones del orden de las centenas de voltios, se busca aislar las unidades de procesamiento de la detección. Es por esto que la medición de tensión se divide en un bloque de alta tensión y otro de baja tensión, para aislar y proteger los componentes de baja tensión y las unidades de procesamiento de las altas tensiones presentes en el sistema. Esto se puede observar en el diagrama de la Figura 6.3.

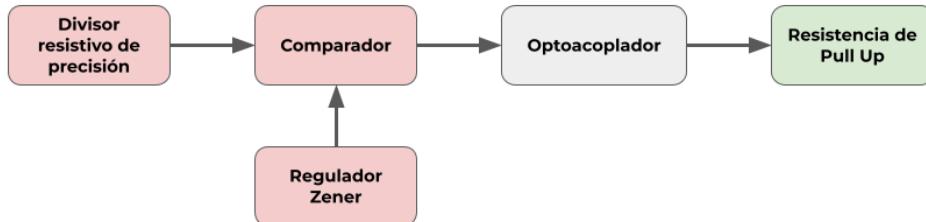


Figura 6.3: Diagrama medición aislada de tensión.

En primer lugar, el bloque de alta tensión se alimenta con una celda del banco de baterías que tiene un rango de voltaje entre 10V y 14V. La función principal de este bloque es medir una alta tensión de entrada (hasta 207V) y reducirla a un nivel manejable para el resto del circuito mediante un divisor resistivo donde se utilizan resistencia de tolerancia 1% y un regulador Zener para la referencia de voltaje.

Entre ambas etapas se coloca un optoacoplador que proporciona aislamiento entre el bloque de alta tensión y el bloque de baja tensión. Esto es crucial para proteger los componentes de baja tensión y las unidades de procesamiento de cualquier sobretensión.

A la salida del optoacoplador se coloca una resistencia de pull-up con una tensión de 3.3V. De esta forma a la salida del sistema se obtiene lógica que indica si la tensión de entrada supera la máxima. Dichos niveles lógicas son compatibles con aquellos de las unidades de procesamiento.

Para tener redundancia de medición, se utilizaron distintos integrados, tanto para la comparación como para la aislación, y distintos reguladores zener.

6.1.2.4. Sensores de actividad del bus CAN

En segundo lugar, para medir la tensión CAN no se debe tener una medición aislada. Por lo tanto, el diagrama consta simplemente de un comparador y una resistencia de pull-up. A la entrada se coloca un amplificador diferencial en configuración restadora debido a que la señal CAN viaja por el Karting en modo diferencial. El diagrama completo se observa en la Figura 6.4.

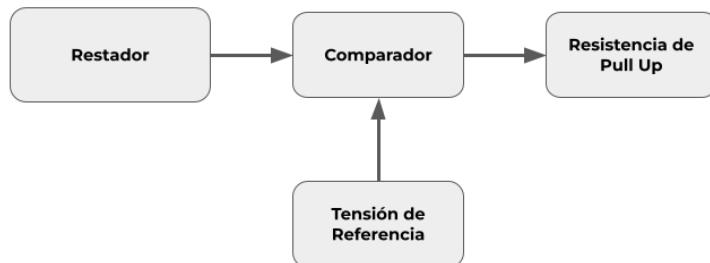


Figura 6.4: Diagrama medición de tensión no aislado.

6.1.2.5. Sensores de corriente

El sensor **ASC772 de Allegro MicroSystems** es un sensor de corriente de alta precisión basado en efecto Hall. Este dispositivo se caracteriza por su amplio rango de detección de corriente (50 A a 400 A) y una resistencia interna muy baja de 100 Ω , lo que minimiza la pérdida de energía. El ASC772 tiene una respuesta rápida de 2.5 μs , lo que permite la detección de fallos por sobrecorriente en aplicaciones críticas. Este sensor es adecuado para aplicaciones automotrices e industriales, tales como el control de motores, detección y gestión de cargas, y control de inversores, gracias a su aislamiento galvánico reforzado que proporciona seguridad y fiabilidad en sistemas de alto voltaje.

Además, este sensor posee una sensibilidad de $10 \frac{mV}{A}$, por lo tanto se coloca un ADC de 12 bits. Por simplificado, se conecta este sensor a la entrada de la ESP32 y se utiliza uno de sus ADCs internos. El diagrama del sistema completo se observa en la Figura 6.5.

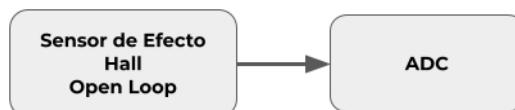


Figura 6.5: Diagrama para el sensor Efecto Hall ACS772.

Para el segundo método de medición, un sensor de corriente magnético de tipo pasante, también basado en el efecto Hall, mas específicamente el **LCSC10T12**. Este sensor está diseñado para medir corrientes nominales de hasta 50 A, con un tiempo de respuesta de 5 μs y una resistencia de aislamiento de 500 M a 500 V DC entre primario y secundario. Su voltaje de salida es lineal con respecto a la corriente medida, con una linealidad del ±0.5 %. Funciona con una fuente de alimentación de 5 V y tiene un consumo de corriente máximo de 20 mA. Este sensor es ideal para aplicaciones que requieren alta precisión y estabilidad térmica.

Para que la FPGA pueda procesar esta información se digitaliza la señal utilizando una tensión de referencia, dada por un divisor resistivo utilizando resistencias de tolerancia %1, un comparador y un pull-up para llevar la salida a una lógica de 3.3V. Esto se observa en el diagrama de Figura 6.6.

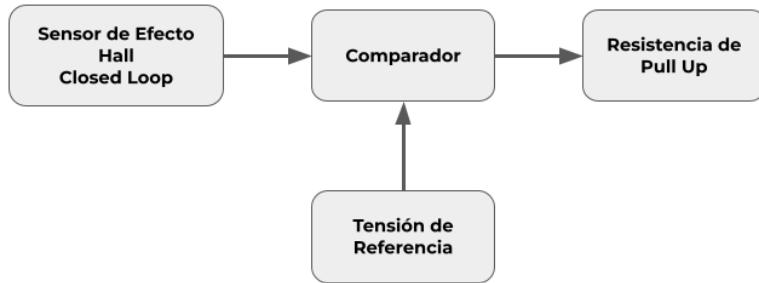


Figura 6.6: Diagrama para el sensor Efecto Hall LCSC10T12.

Es importante notar que debido a que se tiene tanto una corriente de *warning* como una tensión de *danger*, se utiliza en ambos casos el diagrama de Figura 6.6 cambiando el valor de la tensión de referencia. Debido a que la sensibilidad del sensor Tamura es de $10 \frac{mV}{A}$ no es necesario adaptar la señal a la entrada del comparador.

6.1.2.6. Acelerómetro

Para la medición de la aclaración se utilizan dos acelerómetros diferentes, es decir diferentes modelos y diferentes fabricantes. Debido a que cuentan con protocolos de comunicación no sera necesario amplificar la señal de ninguna forma.

En primer lugar, se optó por trabajar con la placa de medición de aceleración **MPU6050**, que se puede comunicar facilmente con la ESP32 utilizando la librería estandar del fabricante, o simplemente utilizando el protocolo de comunicación I2C.

En segundo lugar se utilizó el sensor de movimiento ADXL345. Este es un sensor de 3 ejes, bajo consumo y es conocido por su alta precisión y capacidad para detectar tanto movimientos estáticos como dinámicos. También se comunica con la unidad de procesamiento vía I2C.

6.1.2.7. Implementación de la interfaz de salida

Este módulo es el encargado de funcionar como interfaz de usuario, mostrando si hubo un error en el karting. El módulo fue desarrollado utilizando cuatro LEDs rojos para cada centro de procesamiento. Al apagarse el karting mediante el mecanismo de protección, los centros de procesamiento que detectaron la falla encienden el LED rojo correspondiente (el primer LED corresponde a corriente, el segundo a tensión, el tercero a temperatura, el cuarto a CAN y si todos están apagados, corresponde a aceleración). Estos LEDs se mantienen encendidos utilizando la batería de respaldo.

6.1.2.8. Proceso de implementación

Para implementar este módulo, se siguieron los siguientes pasos:

1. **Conexión a los centros de procesamiento:** Cada centro de procesamiento (microprocesador y FPGA) tiene salidas conectadas a los LEDs correspondientes.
2. **Asignación de LEDs:** Se asignaron cuatro LEDs rojos para cada centro de procesamiento, cada uno indicando un tipo de error diferente:
 - Primer LED: Error de corriente.
 - Segundo LED: Error de tensión.
 - Tercer LED: Error de temperatura.
 - Cuarto LED: Error de CAN.
 - Todos los LEDs apagados: Error de aceleración.
3. **Activación de LEDs:** Cuando se detecta un error que requiere la activación del mecanismo de protección, el centro de procesamiento correspondiente enciende el LED asignado al tipo de error detectado.

4. **Alimentación de los LEDs:** Los LEDs se mantienen encendidos utilizando la batería de respaldo, garantizando que la indicación de error permanezca visible incluso después de que el karting se haya apagado.

Esta implementación asegura una comunicación clara y fiable de los errores al usuario, permitiendo una rápida identificación y resolución de problemas en el karting.

Para la interfaz de comunicación con el usuario se optó por utilizar 4 LEDs por centro de procesamiento. Al apagarse el karting mediante el mecanismo de protección, los centros de procesamiento que detectaron la falla encienden el LED rojo correspondiente (el primer LED corresponde a corriente, el segundo a tensión, el tercero a temperatura, el cuarto a CAN y si todos están apagados, corresponde a aceleración). Estos LEDs se mantienen encendidos utilizando la batería de respaldo.

6.1.2.9. Alimentación auxiliar

Para asegurarnos de poder actuar en casos de falla en la alimentación proveniente del karting y además para poder mantener la interfaz de usuario encendida horas luego de apagado el karting utilizamos un sistema con batería de respaldo. Dicha batería es administrada por el módulo PWR-BMS, el cual utiliza el módulo PowerBoost 1000 de Adafruit para hacer el cambio automático entre fuentes de alimentación, y además para mantener la batería cargada evitando sobretensión y sobrecorriente utilizando la alimentación proveniente del karting.

6.1.3. Detalles de Selección y Cálculo de los Elementos Circuitales de cada Bloque

6.1.3.1. Temperatura

Para la medición de temperatura se utilizará en primera instancia el puente observado en la figura ???. El puente se encuentra alimentado mediante 5V provenientes del sistema de alimentación. En la Figura ?? se observa el circuito completo con el detalle de los componentes a utilizar.

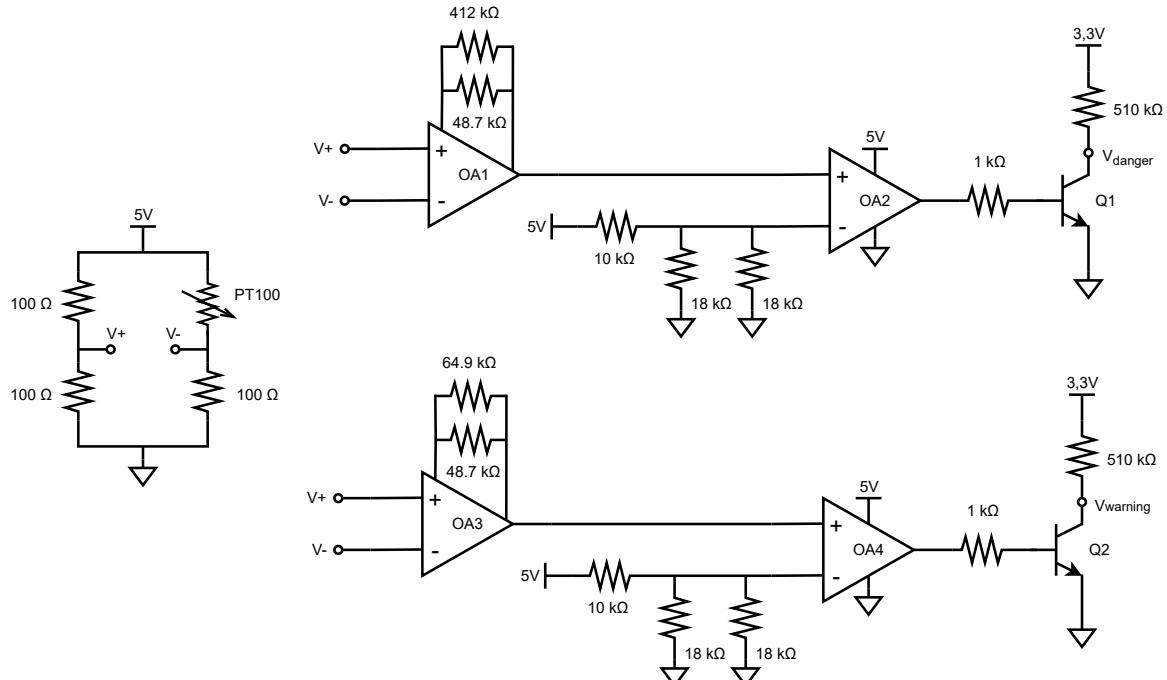


Figura 6.7: circuito de medición de temperatura

	Medición FPGA
OA1	INA122
OA2	INA122
OA1	LM358
OA2	LM358
Q ₁	BC548B
Q ₂	BC547C

Tabla 6.1: Componentes utilizados para la implementación del circuito de medición de temperatura

A continuación se detalló un poteo de la función y cálculo de cada uno de los componentes del circuito de la Figura 6.8:

- Sabiendo que el valor a 0° de la PT100 es $R_0 = 100\Omega$, se seleccionan $R_2 = R_3 = R_4 = 100\Omega$. Las resistencias R_2 , R_3 y R_4 serán de precisión.
- Tomando la temperatura máxima admisible por los inverters $T_{max} = 120^\circ$, se determina la tensión diferencial máxima a la salida del puente. Se utiliza la ecuación para el cálculo de la resistencia de un PT100 con $\alpha = 0.00385$.

$$R_{PT100} = R_0 \cdot (1 + \alpha T_{max}) = 146.2\Omega \quad (6.1)$$

$$V_{out_{120^\circ}} = V_{cc} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 - R_3} \right) \approx 0,4691V \quad (6.2)$$

- Se elige como tensión máxima para 120° un valor de 4.5V, dejando un margen para no dañar las entradas del amplificador. Por lo tanto la ganancia del amplificador debería ser de:

$$G = \frac{4.5V}{V_{out_{120^\circ}}} \approx 9,5922V \quad (6.3)$$

- El amplificador de instrumentación utilizado es el **INA122** de Texas Instruments. Cuya ganancia se rige por la ecuación:

$$G = 5 + \frac{200K}{R_G} \implies R_G \approx 43.552,063\Omega \quad (6.4)$$

- Debido a la necesidad de precisión se utilizaron dos resistencias en paralelo $R_1 = 412k\Omega$ y $R_2 = 48.7k\Omega$ tales que:

$$R_G = 43.551,986\Omega \implies G = 9.5922V \implies V_+ = V_{Sense} = 4.5V \quad (6.5)$$

- Finalmente la tensión de referencia utilizada en el comparador fue realizada mediante un divisor resistivo de precisión:

$$V_{ref} = 5V \cdot \frac{18k\Omega / 18k\Omega}{1k\Omega + 18k\Omega / 18k\Omega} = 4.5V \quad (6.6)$$

Para el sistema de alarma se realiza el mismo procedimiento, nada más que la temperatura a sensar es de 90°. En este caso la tensión de referencia del comparador será la misma, por lo que también lo serán sus resistencias. El sistema utiliza el mismo puente Wheatstone y módulo de alimentación para realizar la medición. La diferencia recae en la ganancia necesitada en el amplificador de instrumentación, la tensión de salida del puente será menor ya que la diferencia de temperatura se ha reducido.

- Utilizando las ecuaciones vistas anteriormente se obtiene la resistencia de ganancia. Se calcula una ganancia $G = 12,1896$, lo cual nos brinda una resistencia $R_G = 27.817,919\Omega$. Se toman valores comerciales de la serie E96 con lo que $R_3 = 64.9k\Omega$ y $R_4 = 48.7k\Omega$.

6.1.3.2. Tensión

Cómo se mencionó en la sección 6.1.2.3, se utilizan para ambas mediciones de tensión circuitos que aislen la tensión de entrada, que puede ser de hasta aproximadamente 200V, de nuestra unidad de procesamiento. En la Figura 6.8 se observa el circuito completo con el detalle de los componentes a utilizar. Para obtener redundancia, se utilizaron distintos modelos y fabricantes de los integrados para cada implementación. Esto se puede observar en la Tabla 6.2.

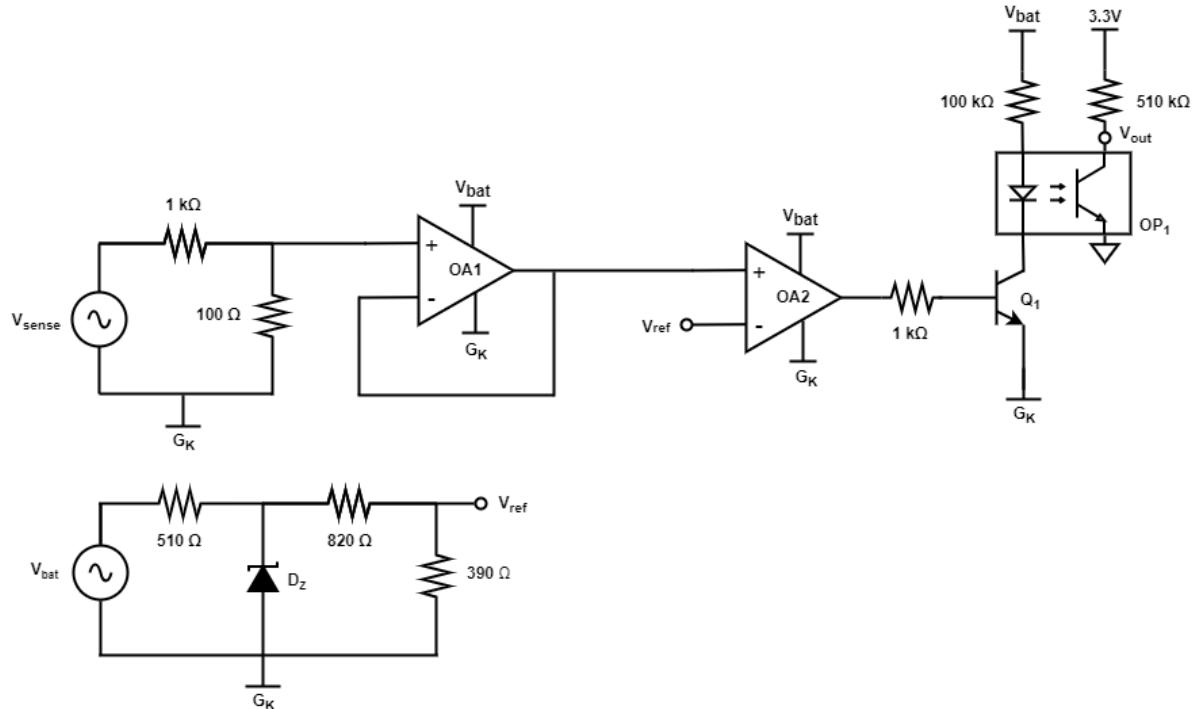


Figura 6.8: Circuito de medición de tensión.

	Medición ESP32	Medición FPGA
OA1	LM358	TLV237
OA2	LM538	TLV237
OP1	4N35	PC817
D _Z	1N4735A	BZX55C6V2
Q ₁	BC547C	2N3904

Tabla 6.2: Se utilizaron distintas marcas y fabricantes para el circuito de medición de tensión se la Figura 6.8

A continuación se detallé un putoeo de la función y cálculo de cada uno de los componentes del circuito de la Figura 6.8:

- A tensión de entrada V_{sense} se le aplica un divisor resistivo que permite bajar su valor para poder ser comparada con la referencia a la entrada del operación OA2:

$$V_- = V_{sense} \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + 10k\Omega} = V_- = V_{sense} \cdot \frac{1}{101} \quad (6.7)$$

- Se utiliza un buffer para disminuir la corriente que circula por la resistencia de $10k\Omega$

- A partir de la tensión de una de las celdas del banco de batería (V_{bat}) se construye un regulador zener que provee una tensión de referencia:

$$V_{ref} = 6.2V \cdot \frac{390\Omega}{390\Omega + 820\Omega} = 1.99834V \quad (6.8)$$

- La tensión de una celda de baterías puede variar entre 10 V y 14 V. En el caso donde la celda entregue 14 V, por la resistencia de 510Ω circularán 15.29 mA y 5 mA por el divisor resistivo. Ergo, no es necesario que los diodos zener de más de $\frac{1}{4}W$.
- Con respecto a la precisión del regulador se midió el circuito previo y posterior al soldado, y se encontró que, utilizando ambos diodos, la tensión de referencia en ningún caso supera los 2,005 V y tiene una variación menor al 2%.
- La tensión de salida del divisor resistivo se compara con la tensión de referencia V_{ref} . Notar que, a una tensión $V_{sense} = 207$ V la tensión en la entrada inversor del OA2 será de 2.049 V, sin tener en cuenta la tolerancia de las resistencias. Teniendo en cuenta una tolerancia del 1% en las resistencias del divisor resistivo y el regulador zener, se encuentra que error en la medición es menor a 5 V. Es decir que el sistema se activará con cualquier tensión mayor a 201 V.
- Cuando la entrada genera una tensión en el nodo inversor del operación OA2 mayor a 201 V, el transistor Q1 amplifica la corriente, lo cual activa el OP1 y produce una tensión de salida $V_{out} = 3.3$ V a la salida. Caso contrario, se obtiene una tensión de 0 V a la salida. Notar que las tensiones de salida tienen como referencia la tierra sistema, a diferencia del resto del circuito que utiliza como referencia la tierra del Karting.

6.1.3.3. Corriente

Cómo se explicó en la sección 6.1.2.5, como primera medición de corriente se utiliza un sensor de corriente open loop junto con un ADC interno de la ESP32. Cómo segunda medición de corriente se utiliza otro sensor de corriente de efecto hall, que produce una salida de $10 \frac{mV}{A}$. Esta tensión debe convertirse en una señal digital con una lógica de 3.3 V. Es por esto que se construyeron los circuitos que se observan en la Figura 6.9. En la Tabla 6.3 se muestra el detalle de los componentes utilizados, notar que nos es necesario que ambas ramas presenten redundancia.

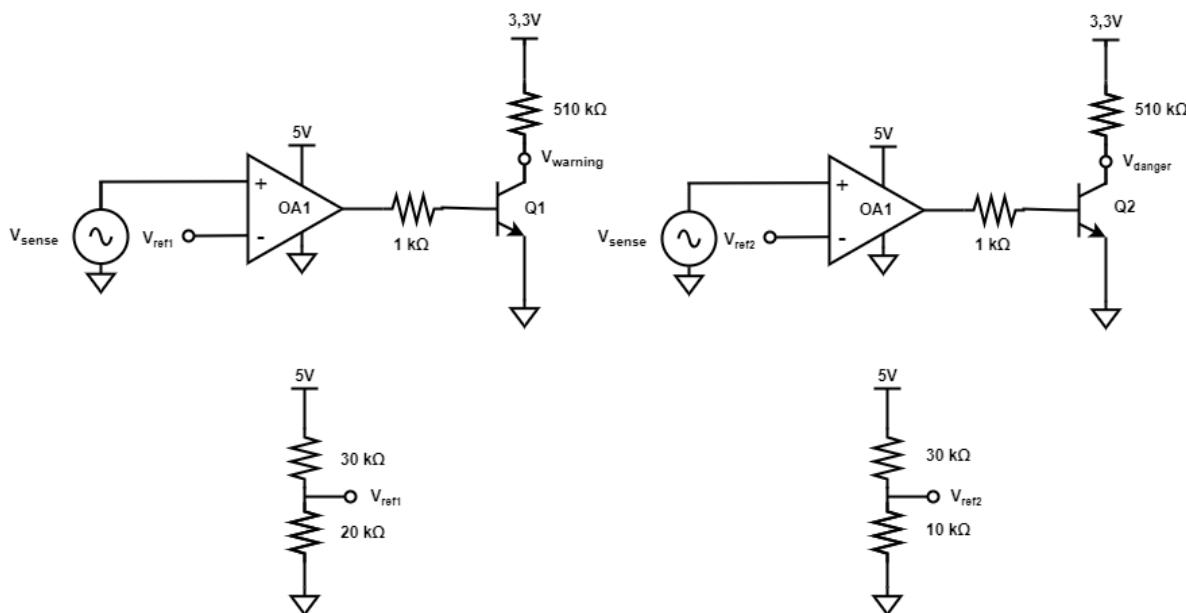


Figura 6.9: Circuito de medición de corriente.

	Medición FPGA
OA1	LM358
OA2	LM358
Q ₁	BC547C
Q ₂	BC547C

Tabla 6.3: Componentes utilizados para la implementación del circuito de la Figura 6.9.

Por un lado, se utiliza un comparador que compara la tensión V_{sense} de entrada con una tensión de referencia 1V, que equivale a 100A. Por el otro, se compara con una señal de referencia de 1.6V, que equivale a 160A. Es decir que, las señales de salida $V_{warning}$ y V_{danger} serán de 3.3V si la corriente a medir es mayor a 100 A y 160 A respectivamente. Será trabajo de la unidad de procesamiento determinar durante cuánto tiempo la señal $V_{warning}$ permanece encendida.

6.1.3.4. Bus CAN

En la Figura 6.11 se muestra el circuito que implementa la detección de señal dentro del bus CAN. La señal CAN se divide en dos señales como las que se observan en la Figura 6.10.

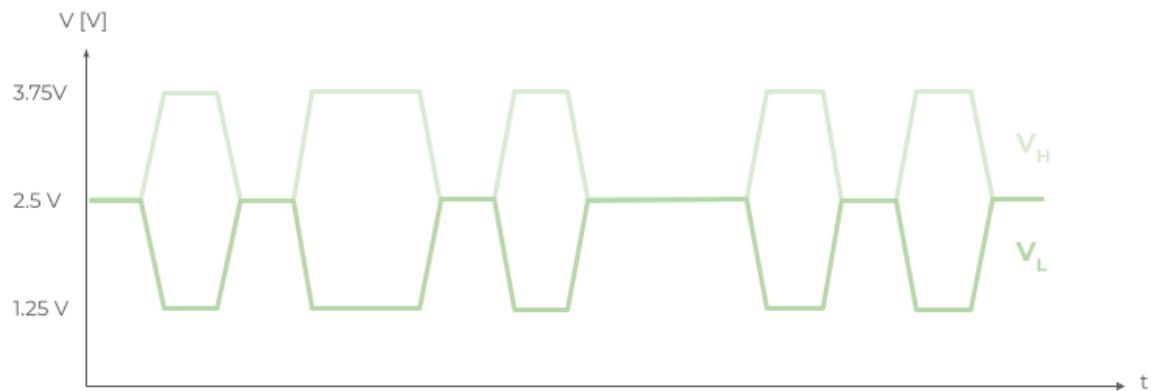


Figura 6.10: Las señales V_H y V_L son recibidas por el sistema que debe detectar la presencia de actividad en el bus.

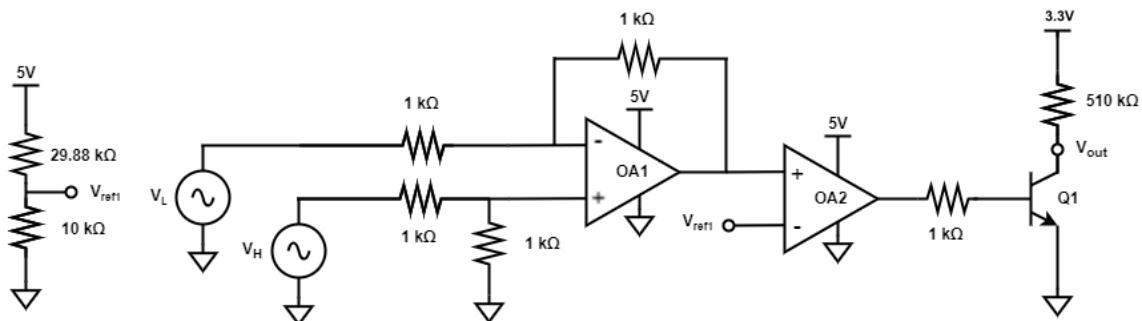


Figura 6.11: Circuito de detección de señal CAN.

Para poder detectar la presencia de actividad en el bus CAN la resta de ambas señales V_H y V_L debe mantenerse constante por al menos 1 segundo. Con lo anterior en la Figura 6.4, el operacional OA1 junto con 4 resistencias

de $1k\Omega$ conforman un restador, que permite que a la entrada no inversora del OA2 se tenga una señal de entre 0V y 2.5V. Utilizando una tensión de referencia de 1.25V, se compara la señal diferencial y entonces la salida V_{out} es de 3.3V siempre que la señal sea mayor a 1.25V, es decir un "1" lógico. Caso contrario, será 0V. Será trabajo de la unidad de procesamiento detectar si la señal se mantiene constante y por quanto tiempo. Para tener redundancia, se utilizaron distintos integrados para ambas implementaciones del circuito, como se ve en la Tabla 6.4.

	Medición ESP32	Medición FPGA
OA1	LM358	TLV237
OA2	LM538	TLV237
Q ₁	BC547C	2N3904

Tabla 6.4: Componentes utilizados para la implementación del circuito de la Figura 6.11.

6.1.4. Plan de Prueba de cada Módulo

6.2. Software

6.2.1. Diagrama de Estados y Fluojogramas

El software utilizado por nuestro producto está compuesto de dos partes. Por un lado, el software implementado en el microprocesador ESP32, que esta compuesto por una maquina de estados secuencial, y por otro lado el firmware implementado en la FPGA ICE40UP5K, que utiliza lógica combinacional y secuencial en paralelo para la detección de errores.

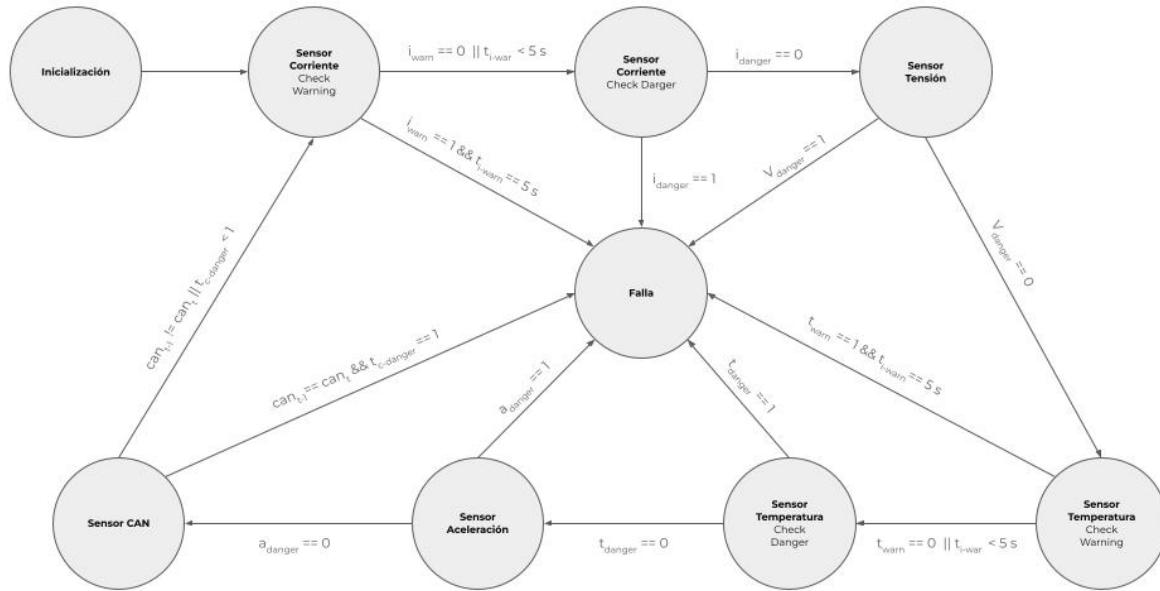


Figura 6.12: Diagrama de Estados - Software Microprocesador

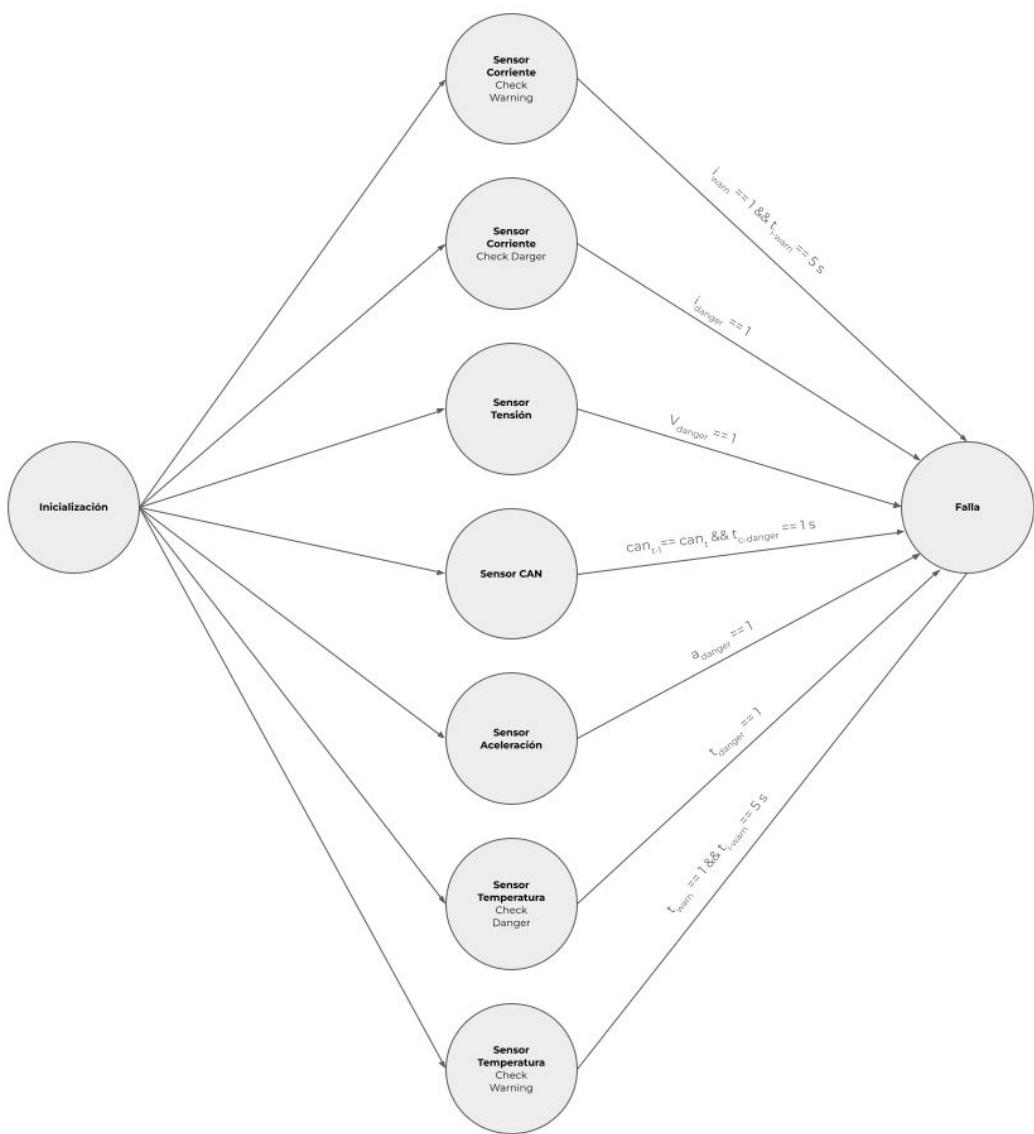


Figura 6.13: Diagrama de estados - Firmware FPGA

El software se compone de cuatro módulos principales:

- **Módulo de Inicialización:** Encargado de inicializar los pines correspondientes a cada sensor, los protocolos de comunicación entre dispositivos, los timers de polling y la calibración de los sensores.
- **Módulo de Sensado:** Encargado de leer y analizar los resultados de las mediciones obtenidas por los sensores colocados en el karting. Recibe las mediciones y las procesa.
- **Módulo de Protección:** Encargado de detectar, luego del procesamiento, si se puede considerar que hay o no una falla en el karting, y activa el módulo de error si corresponda.
- **Módulo de Error:** Se pone en funcionamiento solo si el módulo de protección ha determinado que existió una falla en el karting. Es el encargado de activar las salidas necesarias para el apagado del karting, y de obtener del módulo de protección cual fue la falla originante del problema y activar los LEDs de la salida correspondiente.

Se procede entonces a explicar en detalle cada módulo según los diagramas 6.12 y 6.13:

Inicialización:

Se deben inicializar los dispositivos de sensado tanto de tensión, corriente y temperatura, como los acelerómetros, en ambos centros de procesamiento, además de inicializar la maquina de estados del microcontrolador y los clocks utilizados. Para esto, la secuencia es la siguiente:

- Se configuran en cada centro de procesamiento los pines a los que están conectados dichos sensores como entradas digitales.
- Se configura el clock gating de cada sensor cuando sea necesario.
- Se configura, para el caso del acelerómetro, los protocolos de comunicación correspondiente en los pines conectados a los mismos (I2C para el acelerómetro).
- Se inicializan los timers internos para realizar el polling de cada sensor, y para mantener sincronizada la maquina de estados del procesador con la FPGA.
- Se realiza el calibrado inicial de todos los sensores que lo requieran.
- Se inicializan los pines de interconexión entre el microcontrolador y la FPGA. A través de los mismos es que se comunicaran estos dispositivos de procesamiento para actuar según la lógica de decisión.

Medición/Sensado:

Cada dispositivo de procesamiento recibirá una medición de cada uno de los parámetros de interés, a través de dos sensores de distinta tecnología o fabricante, para aumentar la redundancia en las mismas.

- Se reciben las mediciones crudas de los valores sensados.
- Se procesan según el procedimiento de análisis correspondiente a cada sensor.
- Se cambia de estado al estado de decisión de error.

Protección:

Como se menciono anteriormente, en todo momento ambos dispositivos de procesamiento están interconectados y compartiendo entre ellos la información de cada uno de los sensados a través de los pines de interconexión. Además, uno de estos pines actúa como sincronizador, para que los relojes de ambos sistemas coincidan. Cada vez que se comparte la información de un sensado, se ejecuta la lógica de decisión de error.

- Se reciben en cada dispositivo de procesamiento los resultados de medición obtenidos por el otro centro de procesamiento.
- Se comparan dichos resultados recibidos con el criterio de aceptación de mediciones, que determina si estos resultados se pueden considerar o no una falla:
 - Si ambos resultados del otro centro de procesamiento están fuera del rango aceptable de mediciones, se leen los resultados obtenidos por el propio dispositivo:
 - Si alguna de las mediciones obtenidas también se encuentran en la región de falla, se pasa al estado de error, ya se que considera una alta probabilidad de falla.
 - Si ambas mediciones estuvieran en la región aceptable, se espera un tiempo de $10\mu s$ y se vuelve a realizar la medición, obteniendo además una nueva medición desde el otro dispositivo simultáneamente. Estas nuevas mediciones determinan si se considera una falla total (alguna de las mediciones nuevas del dispositivo propio esta fuera del rango), una falla localizada en el otro dispositivo (ambas mediciones nuevas del dispositivo propio están dentro del rango aceptable y cualquiera de las del otro dispositivo están fuera del mismo), o un falso positivo (si ambas mediciones estuvieran dentro del rango aceptable). En el primer caso, se pasa al estado error, en el segundo, se realiza la desconexión del otro dispositivo de procesamiento y el sistema sigue funcionando con compromiso en su redundancia, y en el tercer caso se prosigue con el funcionamiento normal pero se activa el modo de falla inminente, en el que se reducen los rangos de valores aceptables para cada medición según su sensibilidad.
 - Si solo uno de los resultados del otro dispositivo está fuera del rango aceptable, el procedimiento es muy similar al anterior:

- Se leen los resultados obtenidos por el propio dispositivo.
 - ◊ Si ambas mediciones se encuentran fuera del rango aceptable, se procede al estado de error.
 - ◊ Si solo una estuviese fuera del rango aceptable, y esta proviene del mismo sensor que la medición de falla del otro dispositivo, se considera al sensor como fallido y se desactiva en ambos dispositivos de procesamiento.
 - ◊ Si solo una estuviese fuera del rango aceptable, pero la misma NO proviene del mismo sensor que entregó la medición fallida al otro dispositivo de procesamiento, se procede al estado de error ya que se considera como una alta probabilidad de falla.
 - ◊ Si ambas mediciones estuvieran en la región aceptable, se espera un tiempo de $10\mu s$, se vuelve a realizar la medición, y se actúa de igual manera que lo indicado anteriormente, con la salvedad que en caso de que ambas mediciones sean aceptables nuevamente se procede a seguir con el resto de las mediciones con normalidad.
- Si ninguno de los resultados obtenidos por el otro dispositivo están fuera del rango aceptable, se analizan los resultados propios y se procede de la siguiente manera:
 - Si ambos resultados estuvieran en el rango de mediciones aceptables y estuvieran además dentro de los rangos de discrepancia aceptables de cada sensor, se procede a seguir con el resto de las mediciones con normalidad.
 - Si ambos resultados estuvieran en el rango de mediciones aceptables, pero al comparar el resultado obtenido por el microcontrolador y la FPGA de un mismo sensor, estos discrepan entre si en un porcentaje mayor al rango de discrepancia aceptable (determinado para cada sensor en específico), se procede con el funcionamiento normal pero activando el modo de falla inminente, ya que se considera que existe una probabilidad alta de falla de alguno de los centros de procesamiento.
 - Si alguna de las mediciones propias estuviera fuera del rango aceptable, se procede a deshabilitar el sensor que entregó la medición erronea y se prosigue con el funcionamiento normal. En caso de que dicha medición fuese consecuencia de un error catastrófico, esto será determinado por el otro centro de procesamiento, que será el encargado de avisar del mismo a través de los pines de interconexión.
 - Si ambos resultados propios estuvieran fuera del rango aceptable, se considera que hubo un error en el sistema de procesamiento propio. Se prepara el sistema para la desconexión, guardando cual fue la falla y apagando todos los otros sensores y sistemas, y luego de $10\mu s$ se realiza una última medición. Solo en el caso en el que esta última medición entregue ambos valores dentro del rango es que se revierte el proceso de desconexión y se vuelven a inicializar todos los sensores, pero trabajando ahora en el modo de falla inminente.

6.2.2. Listados Comentados del Código

6.2.2.1. Código ESP32

```

1 // Includes
2 #include <Wire.h>
3 #include <MPU6050.h>
4 #include <OneWire.h>
5 #include <DallasTemperature.h>
6
7 // Constantes
8
9 #define MAX_INV_T 120 // °C
10 #define INT_INV_T 90 // °C
11
12 #define MAX_INV_I 1.6 // V
13 #define INT_INV_I 1 // V
14
15 #define CAN_MS 1000 // ms

```

```

16 #define INV_I_MS 5000 // ms
17 #define INV_T_MS 5000 // ms
18
19 #define MAX_AC 1 // 1G
20
21 // Definición de pines
22 #define CAN_PIN 34
23 #define BATTERY_VOLTAGE_PIN 35
24 #define INVERTER_CURRENT_PIN 32
25 #define TEMPERATURE_PIN 5
26 #define ACC_I2C_SDA 21
27 #define ACC_I2C_SCK 22
28 #define OUTPUT_PIN 4
29
30 // Instancia sensor de aceleración MPU6050
31
32 MPU6050 mpu;
33
34 // Instancia sensor de temperatura 18B20
35
36 OneWire oneWire(TEMPERATURE_PIN);
37 DallasTemperature sensors(&oneWire);
38
39 // Variables para temporización
40 unsigned long lastTempTime = 0;
41 unsigned long lastCurrentTime = 0;
42
43 void setup() {
44     // Iniciar la comunicación serial
45     Serial.begin(115200);
46
47     // Configuración del sensor de aceleración
48     Wire.begin(ACC_I2C_SDA, ACC_I2C_SCK); // SDA, SCL
49     mpu.initialize();
50
51     // Configuración del sensor de temperatura
52     sensors.begin();
53
54     // Configuración pines analógicos y digitales de entrada
55     pinMode(CAN_PIN, INPUT);
56     pinMode(BATTERY_VOLTAGE_PIN, INPUT);
57     pinMode(INVERTER_CURRENT_PIN, INPUT);
58
59     // Configuración salida
60     pinMode(OUTPUT_PIN, OUTPUT);
61     digitalWrite(OUTPUT_PIN, LOW);
62 }
63
64 void loop() {
65     // Leer valor digital del bus CAN
66     int canValue = digitalRead(CAN_PIN);
67     Serial.print("CAN Value: ");
68     Serial.println(canValue);
69
70     // Leer valor digital de la tensión de batería
71     int batValue = digitalRead(BATTERY_VOLTAGE_PIN);
72     Serial.print("Battery Value: ");
73     Serial.println(batValue);
74
75     // Leer valor analógico del pin INVERTER_CURRENT_PIN y convertirlo a tensión
76     int inverterCurrentRaw = analogRead(INVERTER_CURRENT_PIN);
77     float inverterCurrentVoltage = inverterCurrentRaw * 3.3 / 4095;
78     Serial.print("Inverter Current Voltage: ");
79     Serial.println(inverterCurrentVoltage);
80
81     // Leer valor de aceleración
82     int16_t ax, ay, az;
83     int16_t gx, gy, gz;
84     mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
85

```

```

86 // Leer valor de temperatura
87 sensors.requestTemperatures();
88 float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
89 Serial.print("Temperature is: ");
90 Serial.println(temperatureC);

91 // Calcular magnitud de la aceleración
92 float acceleration = sqrt(ax * ax + ay * ay + az * az) / 16384.0; // Convertir a Gs
93 Serial.print("Acceleration is: ");
94 Serial.println(acceleration);

95 // Condiciones para poner la salida en alto
96 if (canValue == LOW ||
97     batValue == LOW ||
98     temperatureC > MAX_INV_T ||
99     inverterCurrentVoltage > MAX_INV_I ||
100    acceleration > MAX_AC) {
101    digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
102 } else {
103    // Verificación de condiciones temporizadas
104    unsigned long currentTime = millis();

105    // Condición de temperatura alta por tiempo prolongado
106    if (temperatureC > INT_INV_T) {
107        if (currentTime - lastTempTime >= INV_T_MS) {
108            digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
109        }
110    } else {
111        lastTempTime = currentTime; // Reset del contador
112    }

113    // Condición de corriente alta por tiempo prolongado
114    if (inverterCurrentVoltage > INT_INV_I) {
115        if (currentTime - lastCurrentTime >= INV_I_MS) {
116            digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
117        }
118    } else {
119        lastCurrentTime = currentTime; // Reset del contador
120    }
121 }

122 // Esperar un tiempo antes de la siguiente lectura (por ejemplo, 1 segundo)
123 delay(1000);
124 }

```

Listing 1: Código .ino

6.2.2.2. Código FPGA

```

1 module protector(gpio_36, gpio_32, gpio_31, gpio_28, gpio_47, gpio_46, gpio_27, gpio_26,
2                         gpio_21);

3 // Inputs:
4 input wire gpio_36, gpio_32, gpio_31, gpio_28, gpio_47, gpio_46, gpio_27, gpio_26;
5
6 // Output:
7 output wire gpio_21;

8
9 parameter MAX_ACC = 16'h0FFF; // Maximum acceleration allowed
10 parameter CLK_FREQ = 10000; // Low speed internal oscillator frequency
11
12 // Initialize registers:
13 reg [31:0] WARN_TO_DANGER = 0;
14 reg [31:0] current_counter = 0;
15 reg [31:0] temp_counter = 0;
16 reg [31:0] can_counter = 0;
17 reg previous_can_value = 0;
18 reg [15:0] accelerometer_value = 0;
19
20 // Give names to the inputs:

```

```

21   wire CAN = gpio_36;
22   wire VOLT_DGR = gpio_32;
23   wire CURR_WARN = gpio_31;
24   wire CURR_DGR = gpio_28;
25   wire TEMP_WARN = gpio_47;
26   wire TEMP_DGR = gpio_46;
27   wire SDA = gpio_27;
28   wire SCL = gpio_26;
29
30 // Initialize trigger and assign it to the output:
31 reg TRIGGER = 0;
32 assign gpio_21 = TRIGGER;
33
34 // Initialize oscillator:
35 wire int_lfosc;
36 SB_LFOSC u_SB_LFOSC(.CLKLFP(1'b1), .CLKLFEN(1'b1), .CLKLF(int_lfosc)); // Low
37   frequency oscillator (LF, 10kHz)
38
39 // Combinational logic to trigger instantaneously if any values are in the danger
40   zone
41 always@{VOLT_DGR or CURR_DGR or TEMP_DGR or WARN_TO_DANGER} begin
42   if ((VOLT_DGR == 1) || (CURR_DGR == 1) || (TEMP_DGR == 1) || (WARN_TO_DANGER ==
43     1))
44     TRIGGER <= 1;
45   else
46     TRIGGER <= 0; // TODO: Probably remove this, we should only reset after the
47       RST is activated
48 end
49
50 // Each clock cycle (or if the reset pin has been activated)
51 always@{posedge int_lfosc} begin
52
53   // Add one to the counter of any activated warning signals
54   if (CURR_WARN == 1)
55     current_counter <= current_counter + 1;
56   else
57     current_counter <= 0;
58
59   if (TEMP_WARN == 1)
60     temp_counter <= temp_counter + 1;
61   else
62     temp_counter <= 0;
63
64   if (CAN != previous_can_value) begin
65     can_counter <= 0;
66     previous_can_value <= CAN;
67   end
68   else begin
69     can_counter <= can_counter + 1;
70   end
71
72   // Check to see if we should activate the danger signal
73   if (current_counter >= 5*CLK_FREQ || temp_counter >= 5*CLK_FREQ || can_counter
74     >= 10*CLK_FREQ) begin
75     WARN_TO_DANGER <= 1;
76   end
77   else begin
78     WARN_TO_DANGER <= 0;
79   end
80 end
81
82 endmodule

```

Listing 2: Código Verilog para FPGA

7. Construcción del Prototipo

7.1. Definición de los Módulos

El proyecto se dividió en tres placas específicas. En la de mayor tamaño se encuentra el circuito principal o centro de procesamiento, donde se reciben las mediciones de todos los sensores y se realiza el acondicionamiento necesario para luego procesar la información y tomar las acciones correspondientes. El segundo módulo o circuito, es el sistema de salida, que se encuentra en una placa de menor tamaño para permitir una mejor colocación cerca del circuito de encendido del karting. Además, es importante destacar que la alimentación del karting, el sistema de encendido y las variables de medición están distribuidos, lo que también influyó en la decisión de diseñar algunos de los módulos en placas específicas. Finalmente, se encuentra el sistema de alimentación con su batería de respaldo, el cual también se realizó en una placa particular por las razones mencionadas anteriormente.

En la siguiente sección se describirá el proceso de fabricación de cada uno en detalle. Todas las unidades de circuitos impresos (PCB por sus siglas en inglés, Printed Circuit Board) fueron diseñadas en Altium Designer.

7.2. Diseño de los Circuitos Impresos

7.2.1. Circuito impreso de la unidad de procesamiento

Esta unidad esta compuesta de las dos placas de desarrollo (FPGA y ESP32) y los respectivos circuitos para adaptar las salidas de los sensores. El diseño fue hecho para cumplir con la especificación de dimensión y peso. En particular, este módulo fue construido en una placa 15cm x 20cm.

Para la implementación se hicieron dos prototipos, unos de prueba y otro definitivo. Si bien ambos prototipos son funcionales, la principal diferencia está en el layout. En la figura 7.1 se puede observar el desarrollo del primer prototipo del sistema.

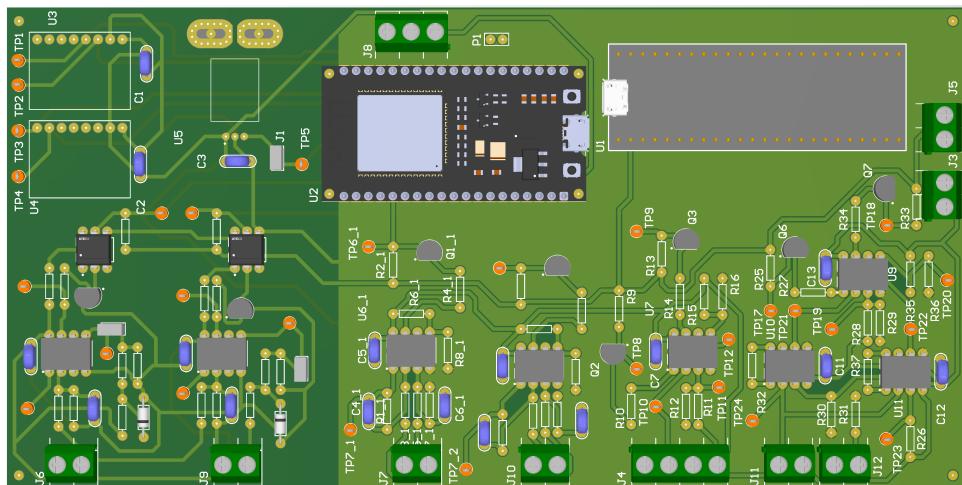


Figura 7.1: Vista 3D desde Altium

La construcción del prototipo se llevó a cabo en el Laboratorio de Electrónica del ITBA. Es importante destacar que se decidió utilizar todos los componentes THT debido a la facilidad de construcción, soldadura y medición del circuito. En la figura 7.2 se puede observar la placa del primer prototipo construido.

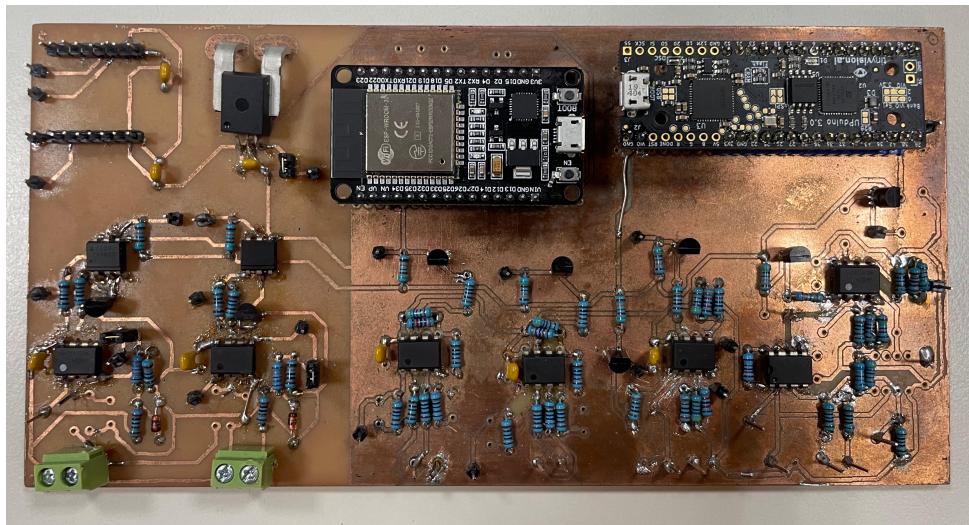


Figura 7.2: Implementación física del primer prototipo

Si bien se tiene solamente una placa impresa para la unidad, en verdad se tiene dos sistemas que están completamente aislados, salvo por la alimentación. Es por esto que para el segundo prototipo, con el fin de facilitar el layout, se separó del lado de derecho la ESP32 (observando la Figura 7.3) con todos sus respectivos circuitos de adaptación, y del lado de izquierdo la Upduino con todos sus respectivos circuitos de adaptación. La única excepción es para el circuito de medición de tensión, donde se aisló la parte de alta tensión en el sector inferior derecho del resto del circuito. Este placement nos ahorró tener un usar un plano de tierra que ocupa gran parte de la placa, y ergo facilitó el soldado de los componentes. Una descripción más detallada del placement para el segundo prototipo se muestra en la figura 7.5.

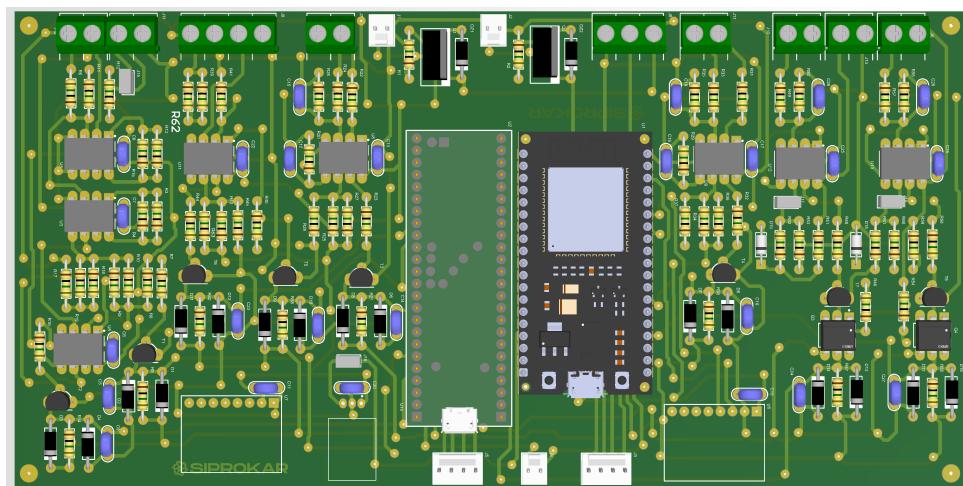


Figura 7.3: Vista 3D desde Altium

Nuevamente, el desarrollo del prototipo se realizó en el laboratorio de electrónica. La eliminación del plano de masa facilitó la soldadura de los componentes, evitando la formación accidental de cortocircuitos. Sin embargo, la gran cantidad de vías utilizadas retrasó el ensamblaje del prototipo más de lo esperado. En la figura 7.4.

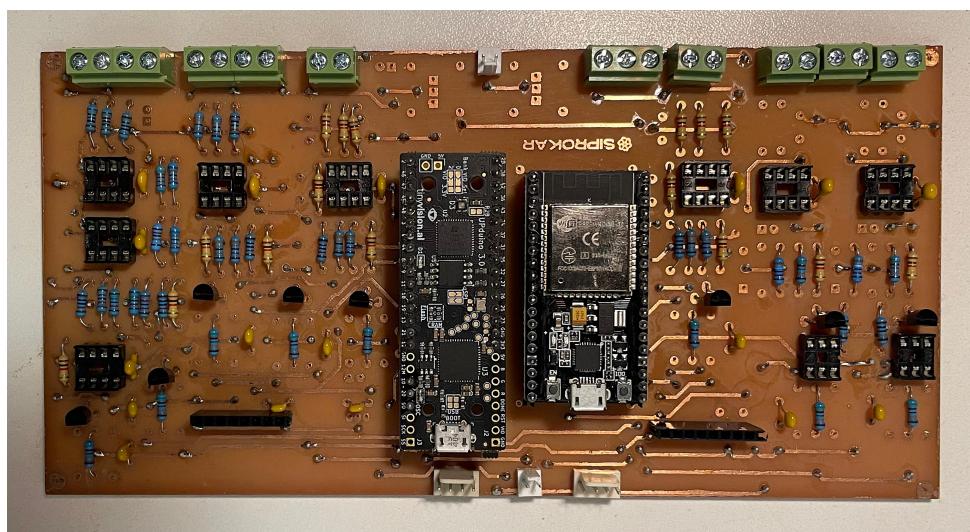


Figura 7.4: Implementación física del segundo prototipo

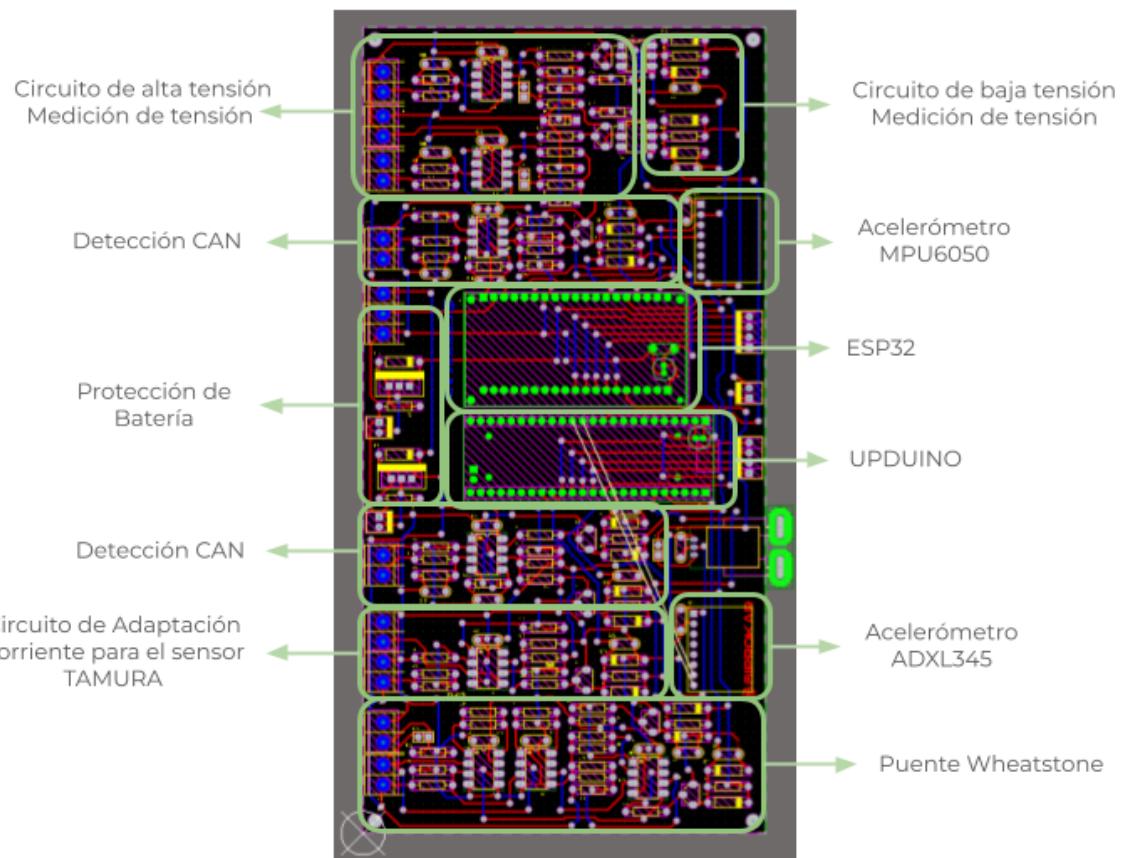


Figura 7.5: Descripción del placement para el segundo prototipo fabricado.

7.2.2. Circuito impreso del modulo de salida

El circuito de salida también fue realizado en dos versiones diferentes. La primera implementación se realizó en una placa de $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, donde solo se encontraban los relés necesarios para interrumpir el sistema de

encendido del karting. En la figura 7.6 se puede observar el circuito impreso del primer prototipo.

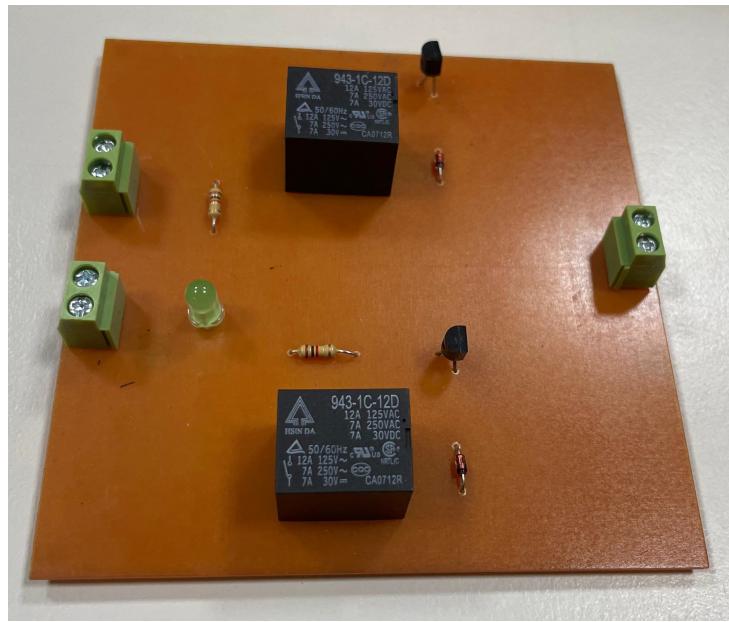


Figura 7.6: Implementación física del primer prototipo

En la segunda versión, se decidió reducir el tamaño de la placa a $10\text{cm} \times 5\text{cm}$ para obtener una mayor versatilidad al colocarla dentro del karting. Además, se añadió una interfaz de usuario para representar las diferentes fallas que pueden ocurrir en el karting. En la figura 7.7 se puede observar la vista en tres dimensiones del circuito.

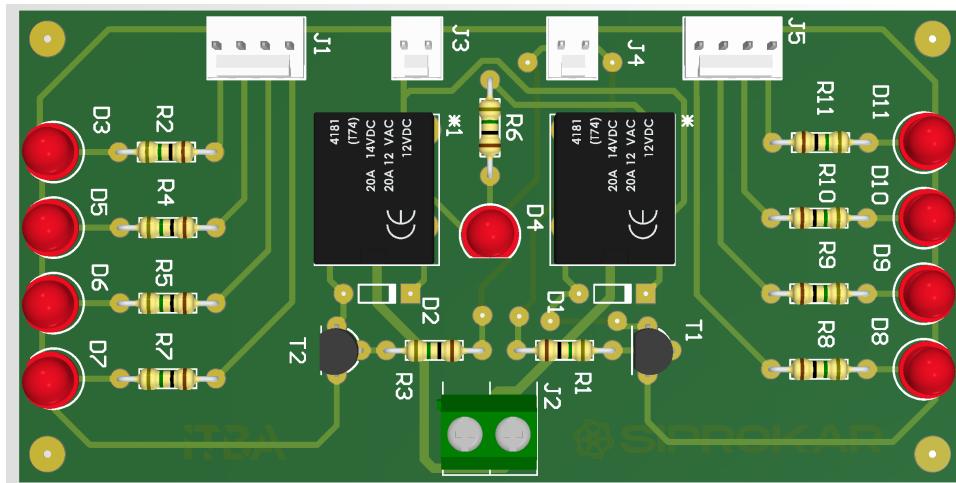


Figura 7.7: Vista 3D desde Altium

Dado el pequeño tamaño de la placa utilizada, fue necesario optar por una placa de doble cara. Esto permitió la implementación de vías en ambas caras. Al aprovechar ambas superficies de la placa, se logró compactar los componentes tanto como fue posible, optimizando el espacio disponible y mejorando la funcionalidad del diseño. En la figura 7.8

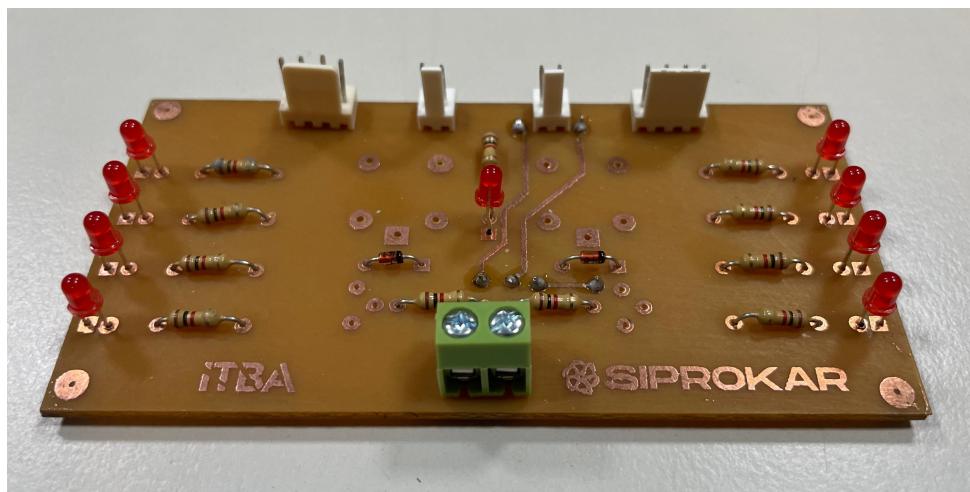


Figura 7.8: Implementación física del segundo prototipo

7.2.3. Circuito impreso del sistema de alimentación

El sistema de alimentación se diseñó en una placa de $10\text{cm} \times 5\text{cm}$. La cantidad reducida de componentes permitió utilizar una placa de una sola cara, lo cual facilitó el diseño en el programa de desarrollo Altium. En la figura 7.9 se puede observar la vista 3D.

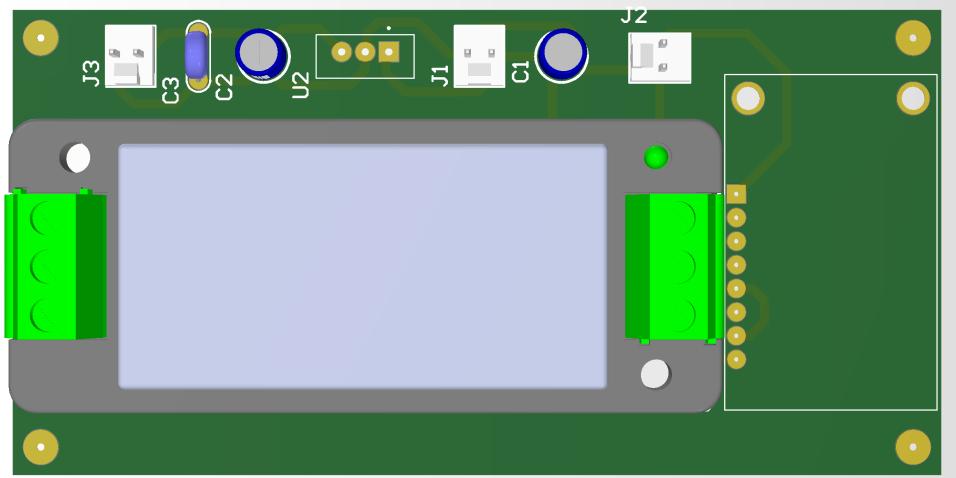


Figura 7.9: Vista 3D

7.3. Instalación de sensores en el Karting

En esta sección se abordará la ubicación de la placa y de los diferentes sensores dentro del karting. Esta prueba de campo se realizó para identificar los aspectos clave a tener en cuenta al integrar nuestro proyecto con el karting.

Inicialmente, la placa principal se ubicará encima de las baterías de alimentación, más específicamente en el lado izquierdo del karting, donde se encuentra el circuito de encendido. En la figura 7.10 se puede observar la ubicación utilizada.

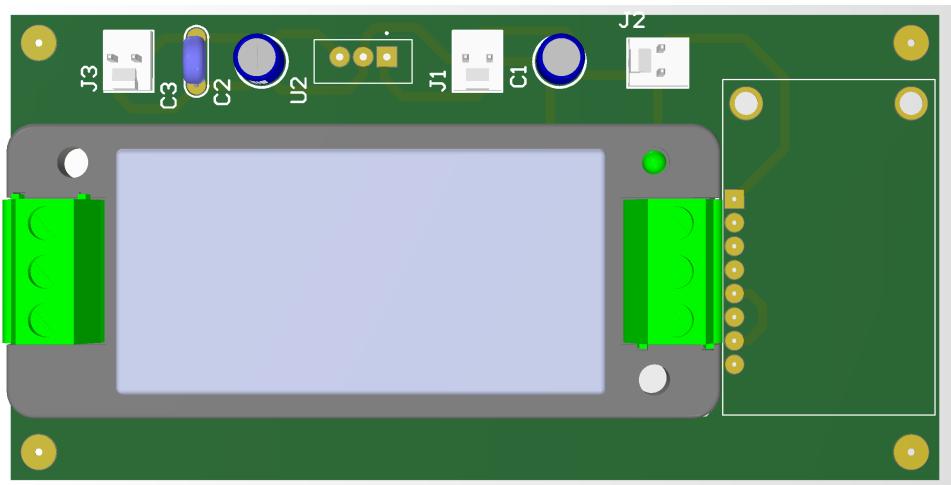


Figura 7.10: Ubicación placa principal

Los sensores de temperatura se colocarán en los disipadores del karting y se acoplarán mediante el uso de pasta térmica para una mejor lectura de la temperatura. La figura 7.11 muestra una imagen del disipador del inverter.



Figura 7.11: Ubicación sensores de temperatura

A continuación, se presenta la conexión utilizada para medir la actividad del bus CAN. Afortunadamente, el karting cuenta con conexiones en paralelo que permiten monitorear el bus CAN sin interrumpir su funcionamiento normal. La figura 7.12 muestra la conexión utilizada para sensar el bus CAN.

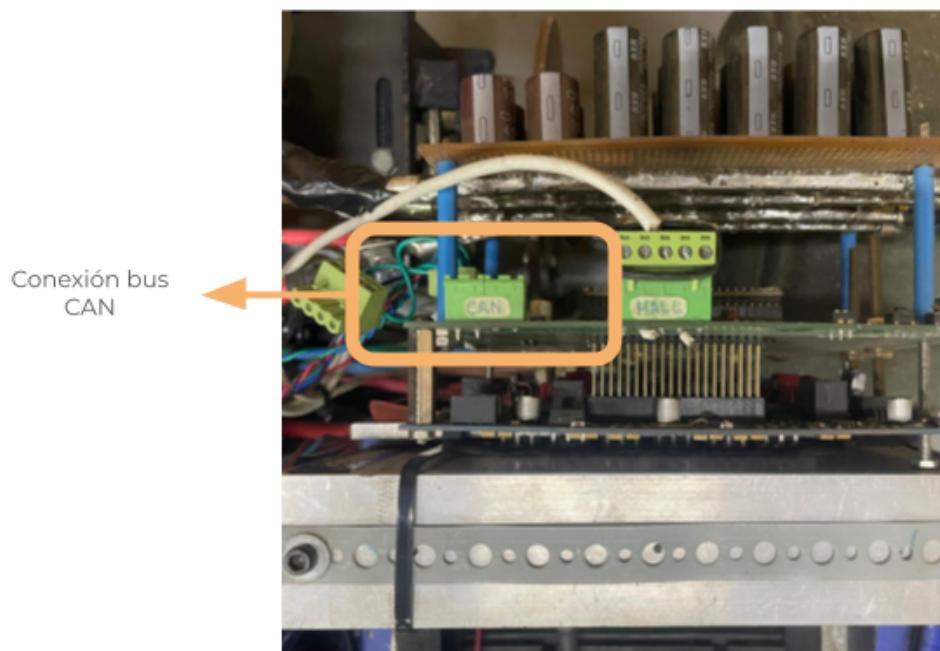


Figura 7.12: Ubicación de la conexión al bus CAN

Para medir la tensión del banco de baterías, nos conectaremos después del contactor, cuya ubicación se puede observar en la figura 7.13.

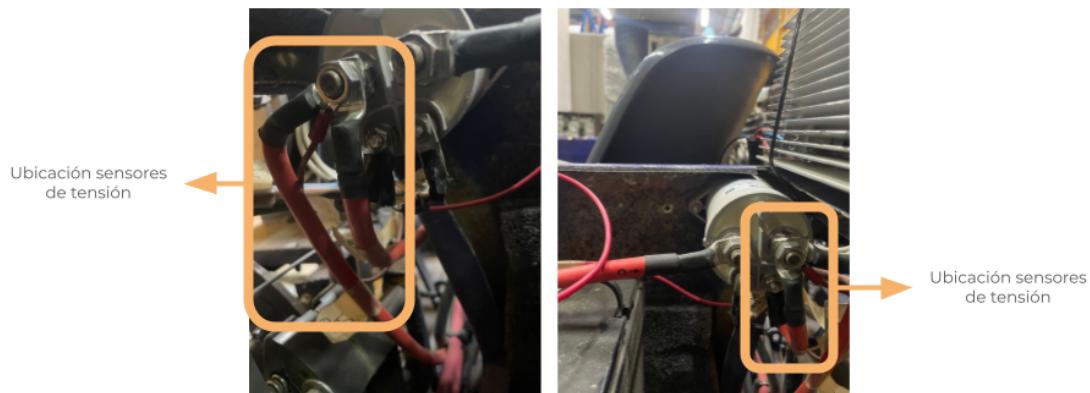


Figura 7.13: Ubicación de los sensores de tensión

En cuanto a la medición de corriente, uno de los sensores se colocará en paralelo, es decir, rodeará el cable que conecta los inverters. La figura 7.14 muestra el cable y la ubicación del sensor. El otro sensor de corriente es de tipo serie, por lo que debe conectarse entre dos de las baterías del karting. La mejor opción es utilizar las baterías del lado derecho, que cuentan con una abertura para ubicar el sensor, como se muestra en la figura 7.14.

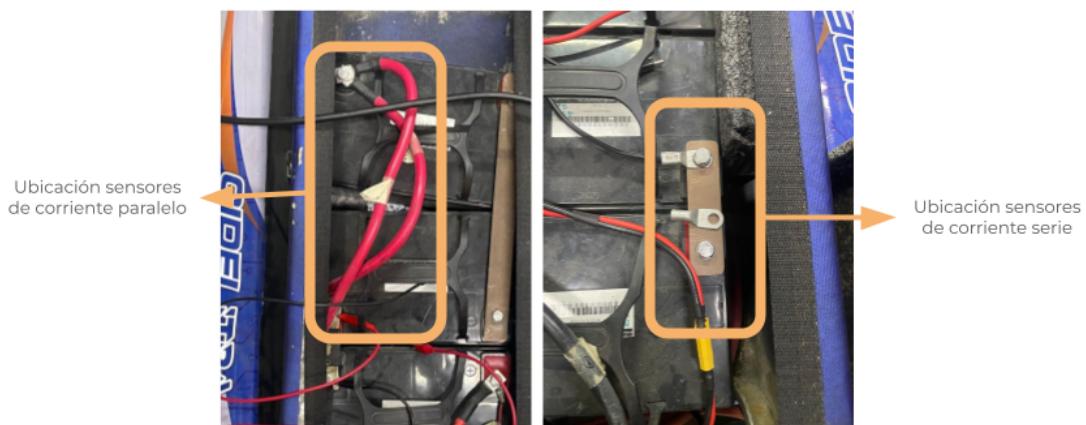


Figura 7.14: Ubicación de los sensores de corriente

Es importante destacar cómo será el conexionado de alimentación del sistema. Afortunadamente, será posible conectarse mediante conectores de alta tensión provistos por el cliente. Finalmente, debemos conectarlos al circuito de encendido del karting. En la imagen 7.15 se pueden apreciar los cables y la ubicación del circuito que debemos interrumpir.

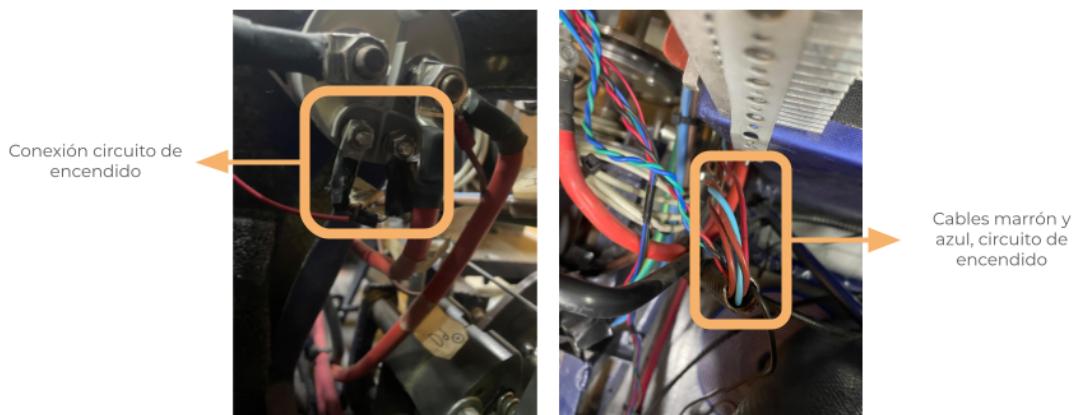


Figura 7.15: Ubicación del circuito de salida

7.4. Bill Of Materials (BOM)

Dispositivo / Elemento	Valor	Cantidad	Descripción
Capacitor Cerámico	820 nF	2	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	8.2 nF	4	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	100 nF	11	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	1 nF	4	Capacitor de desacople / Filtros
1N5819	-	19	Diodo Schottky
1N4735A	-	1	Diodo Zener 6.2V
BZX55C6V2	-	1	Diodo Zener 6.2V

MOLEX	2	3	-
MOLEX	4	2	-
Bornera	2	7	-
Bornera	3	1	-
Bornera	4	1	-
Jumper	-	4	-
MOSFET P	-	2	Protección de Batería
4N35	-	1	Optoacoplador
PC817	-	1	Optoacoplador
BC547C	-	4	NPN
2N3904	-	4	NPN
Test Points	.	30	-
ESP32_NODEMCU	-	1	-
UPDUINO	-	1	-
INA122P	-	2	Amplificador de Instrumentación
LM358AP	-	3	Amplificador Operacional
TLV237	-	3	Amplificador Operacional
Resistencia	100 Ω	4	1/4 W, 1 %
Resistencia	10k Ω	5	1/4 W, 1 %
Resistencia	412 kΩ	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	100 kΩ	10	1/4 W, 1 %
Resistencia	18k Ω	1	1/4 W, 1 %
Resistencia	1k Ω	7	1/4 W, 1 %
Resistencia	510 kΩ	10	1/4 W, 1 %
Resistencia	510 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	820 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	390 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	20 kΩ	4	1/4 W, 1 %
Resistencia	30 kΩ	4	1/4 W, 1 %
PYBE20-Q24-S5-T	-	1	Conversor DC-DC aislado, input 9V a 36V, output 5V, 20W max
PowerBoost 1000 C	-	1	Battery Management System con passthrough, 1A, Adafruit
LMS1587	3.3V	1	LDO de 5V a 3.3, 5A max
Capacitor	100uF	1	Ceramico

Capacitor	10uF	2	Electrolitico
Molex 2 pin	-	3	

Tabla 7.1: Lista de componentes (BOM)

8. Validación del Prototipo

8.1. Estudios de Confiabilidad de Hardware y Software

En esta sección se llevará a cabo el estudio de la confiabilidad del sistema. Inicialmente, se presentará el análisis detallado de la confiabilidad del hardware, evaluando los componentes físicos y su desempeño bajo diversas condiciones operativas. Posteriormente, se realizará el análisis de la confiabilidad del software, abordando la robustez, integridad y capacidad del sistema para manejar fallos y mantener su funcionalidad a lo largo del tiempo.

8.1.1. Hardware

Para evaluar la confiabilidad del hardware, se utilizará la norma MIL-HDBK-217F, ampliamente reconocida en la industria por proporcionar métodos detallados para calcular las tasas de fallos de componentes electrónicos. Esta norma establece criterios para analizar diversos factores que afectan la confiabilidad del hardware, incluyendo las condiciones ambientales, el estrés eléctrico y térmico, así como la calidad de los componentes. Antes de proceder con este análisis, se elaborará un diagrama de confiabilidad que identifique y destaque los bloques más importantes del sistema, permitiendo una visión clara de las interdependencias y puntos críticos que requieren atención especial.

En la figura 8.1 se encuentra el diagrama de confiabilidad del producto. Se consideraron las redundancias integradas en el sistema. Por ejemplo, se estableció que si fallan dos sensores que miden la misma variable, el circuito debería fallar. Sin embargo, si fallan dos sensores que miden variables diferentes, el circuito debe continuar funcionando sin interrupciones, asegurando la continuidad operativa del sistema. Además, se implementó una redundancia específica dentro del módulo de alimentación, garantizando que el sistema mantenga su funcionamiento incluso en caso de fallos en la fuente de alimentación principal.

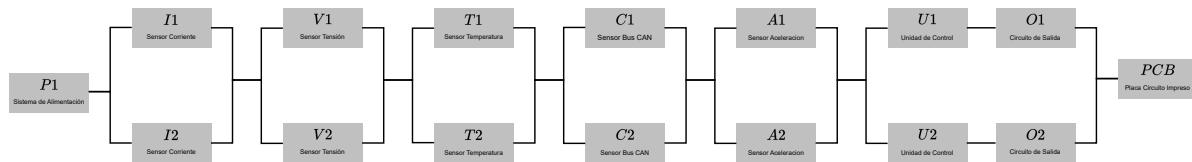


Figura 8.1: Diagrama de Confiabilidad del sistema

Dentro del diagrama de confiabilidad se destaca que el único módulo que cuenta con redundancia interna es el de alimentación; el resto de los módulos no tienen redundancia en sus componentes, por lo que su confiabilidad se determinará mediante la confiabilidad en serie de cada uno de sus partes. En la tabla 8.1 se presentarán las ecuaciones utilizadas para calcular la tasa de fallos de cada uno de los componentes electrónicos de los módulos, proporcionando un marco cuantitativo para evaluar la confiabilidad global del sistema.

A la hora de elegir las variables multiplicativas de la ecuación de tasa de fallos, es importante considerar ciertas condiciones operativas críticas. En este estudio, se asume una temperatura de operación de 50°C. Además, dado que el prototipo estará colocado dentro del karting eléctrico, se considera que su ambiente será siempre de tipo móvil (GM), lo que implica un entorno con vibraciones y movimientos constantes que también afectan la confiabilidad de los componentes.

Componentes	Ecuación de tasa de fallos
Resistencia	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_P \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Capacitor	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_C \cdot \pi_V \cdot \pi_{SR} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Diodo	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Transistor BJT	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Transistor MOSFET	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Integrado (IC)	$\lambda_p = [C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E] \cdot \pi_L \cdot \pi_Q$
Microprocesador	$\lambda_p = [C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E] \cdot \pi_L \cdot \pi_Q$
FPGA	$\lambda_p = [C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E] \cdot \pi_L \cdot \pi_Q$
Optoacoplador	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$ $\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Relé	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_L \cdot \pi_C \cdot \pi_{CYC} \cdot \pi_F \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Conecotor	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_K \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Jumper	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_E$
PCB	$\lambda_p = \lambda_b \cdot [N_1 \cdot \pi_C + N_2 \cdot (\pi_C + 13)] \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
PCB	$\lambda_p = \lambda_b \cdot [N_1 \cdot \pi_C + N_2 \cdot (\pi_C + 13)] \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Conecotor	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_K \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$

Tabla 8.1: Ecuaciones de tasa de fallos de componentes electronicos

Para el cálculo de la confiabilidad del hardware, se utilizará el modelo exponencial. Este modelo es ampliamente empleado en análisis de confiabilidad debido a su simplicidad y su adecuación a situaciones donde la tasa de fallos se mantiene constante a lo largo del tiempo. Utilizando este modelo, podemos calcular la confiabilidad del sistema a partir de la tasa de fallos λ de sus componentes, permitiendo así una estimación precisa del tiempo medio entre fallos (MTBF) y la probabilidad de funcionamiento sin fallos durante un período específico.

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda}{10^6} \cdot t} \quad (8.1)$$

8.1.1.1. Sensores de Corriente - I1 e I2

Los módulos de sensado de corriente se analizarán de forma separada. Esto se debe a que uno de los sensores se utilizó de forma directa, es decir, su señal no pasa por ningún circuito de acondicionamiento o transformación digital.

Para los sensores de corriente específicamente utilizados, no se encontró información sobre la tasa de fallos en las hojas de datos de sus fabricantes. Por lo tanto, se realizó una estimación para poder calcular la confiabilidad del módulo. El módulo que solo tiene un sensor tendrá la confiabilidad de tan solo ese componente, mientras que el sensor cuya señal es acondicionada tendrá una confiabilidad calculada que se encuentra detallada en la tabla 8.2.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_A	π_P	π_R	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	π_K	λ_p	λ
Resistencia	10	0.0037	1.3	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	0.446368	4.46368	
Capacitor	3	0.00099	2.9	20	10	-	0.81	-	-	-	1	1	-	-	-	0.465102	1.395306	
Diodo	4	0.003	1.4	9	8	0.054	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01633	0.0653184	
Transistor BJT	2	0.00074	1.7	9	8	0.11	-	0.7	-	0.43	-	-	-	-	-	0.002999	0.005997943	
Amplificador (IC)	1	-	0.34	4	1	-	-	-	-	-	-	1	0.01	0.0021	-	0.0118	0.0118	
Conector	3	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.104	3.312	
Sensor Corriente	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	
TOTAL																	9.26410234272	

Tabla 8.2: Confiabilidad componentes modulo de corriente

Siguiendo la definición de confiabilidad para un modelo exponencial se sabe que la confiabilidad en función del tiempo $R(t)$ sera dada por la ecuación 8.1. Finalmente, se puede observar en la tabla 8.3 la confiabilidad del modulo a lo largo del tiempo.

$$R_I = R_{I1} + R_{I2} - R_{I1} \cdot R_{I2} \quad (8.2)$$

Confiabilidad modulos de corriente										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{I1}(t)$	0.9208	0.8479	0.7808	0.7190	0.6621	0.6097	0.5614	0.5169	0.4760	0.4383
$R_{I2}(t)$	0.9999	0.9998	0.9997	0.9996	0.9996	0.9995	0.9994	0.9993	0.9992	0.9991
$R_I(t)$	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9997	0.9997	0.9996	0.9995

Tabla 8.3: Confiabilidad modulo de sensado de corriente y submodulos

8.1.1.2. Sensores de Tensión - V1 y V2

Los módulos de tensión del sistema cuentan con la misma topología, por lo que su análisis de confiabilidad será idéntico para cada uno de ellos.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_A	π_P	π_R	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	π_K	λ_p	λ
Resistencia	8	0.0037	1.3	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	0.446368	3.570944	
Capacitor	3	0.00099	2.9	20	10	-	0.81	-	-	-	1	0.66	-	-	-	0.30696732	0.920902	
Diodo	3	0.003	1.4	9	8	0.054	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0163296	0.048989	
Transistor BJT	1	0.00074	1.7	9	8	0.11	-	0.7	-	0.43	-	-	-	-	-	0.002998971	0.002999	
Amplificador (IC)	1	-	0.34	4	1	-	-	-	-	-	-	-	1	0.01	0.0021	-	0.0118	0.0118
Optoacoplador	1	0.013	1.4	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1648	1.1648	
Conector	2	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.104	2.208
TOTAL																	7.928434	

Tabla 8.4: Confiabilidad componentes del módulo de tensión

Confiabilidad modulos de tension											
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R_{V1}(t)$	0.9278	0.8608	0.7987	0.7410	0.6875	0.6379	0.5918	0.5491	0.5095	0.4727	
$R_{V2}(t)$	0.9278	0.8608	0.7987	0.7410	0.6875	0.6379	0.5918	0.5491	0.5095	0.4727	
$R_V(t)$	0.9948	0.9806	0.9595	0.9329	0.9024	0.8689	0.8334	0.7967	0.7594	0.7219	

Tabla 8.5: Confiabilidad módulo de sensado de tensión y submódulos

8.1.1.3. Sensores de Temperatura - T1 y T2

Nuevamente, los módulos de temperatura serán analizados de forma independiente. Uno de los módulos utiliza el integrado DS18B20 para la medición de la temperatura, el cual se conecta directamente a la placa, por lo que su tasa de fallos estará determinada únicamente por la del integrado. Con el otro módulo, se realizará un estudio de confiabilidad más detallado ya que cuenta con varios circuitos para el acondicionamiento de las mediciones provenientes del sensor de temperatura. En la tabla ?? se puede ver el estudio de confiabilidad.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_A	π_P	π_R	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	π_K	λ_p	λ
Resistencia	16	0.0037	1.3	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	0.446368	7.141888	
Capacitor	5	0.00099	2.9	20	10	-	0.81	-	-	-	1	1	-	-	-	0.465102	2.32551	
Diodo	4	0.003	1.4	9	8	0.054	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01633	0.0653184	
Transistor BJT	2	0.00074	1.7	9	8	0.11	-	0.7	-	0.43	-	-	-	-	-	0.002999	0.005997943	
Amplificador (IC)	3	-	0.34	4	1	-	-	-	-	-	-	-	1	0.01	0.0021	-	0.0118	0.0354
Conector	3	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.104	3.312
RTD	1	0.0019	1	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	0.17632	0.17632	
TOTAL																	13.06243434272	

Tabla 8.6: Confiabilidad componentes del módulo de temperatura

Confiabilidad módulos de corriente											
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R_{T1}(t)$	0.8883	0.7891	0.7010	0.6228	0.5532	0.4914	0.4366	0.3878	0.3445	0.3061	
$R_{T2}(t)$	0.9998	0.9996	0.9994	0.9991	0.9989	0.9987	0.9985	0.9983	0.9981	0.9979	
$R_T(t)$	1.0000	0.9999	0.9998	0.9997	0.9995	0.9994	0.9992	0.9990	0.9987	0.9985	

Tabla 8.7: Confiabilidad módulo de sensado de temperatura y submódulos

8.1.1.4. Sensores de Bus CAN - C1 y C2

Los módulos de sensado de la actividad del bus CAN tienen la misma topología y estructura de diseño, por lo que el análisis de confiabilidad será similar para todos ellos. Es importante recordar que todos los componentes en estos módulos se encuentran en serie.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_A	π_P	π_R	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	π_K	λ_p	λ
Resistencia	9	0.0037	1.3	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	0.446368	4.017312	
Capacitor	4	0.00099	2.9	20	10	-	0.81	-	-	-	1	0.66	-	-	-	0.306967	1.227869	
Diodo	2	0.003	1.4	9	8	0.054	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01633	0.032659	
Transistor BJT	1	0.00074	1.7	9	8	0.11	-	0.7	-	0.43	-	-	-	-	-	0.002999	0.002999	
Amplificador (IC)	1	-	0.34	4	1	-	-	-	-	-	-	1	0.01	0.0021	-	0.0118	0.0118	
Optoacoplador	1	0.013	1.4	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1648	1.1648	
Conecotor	2	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.104	2.208	
TOTAL																	8.665439	

Tabla 8.8: Confiabilidad componentes del modulo del bus CAN

De forma análoga al análisis de módulos anteriores. Se puede observar en la tabla 8.9 la confiabilidad del modulo a lo largo del tiempo.

Confiabilidad módulos de bus CAN										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{C1}(t)$	0.9257	0.8569	0.7932	0.7342	0.6797	0.6291	0.5824	0.5391	0.4990	0.4619
$R_{C2}(t)$	0.9257	0.8569	0.7932	0.7342	0.6797	0.6291	0.5824	0.5391	0.4990	0.4619
$R_C(t)$	0.9945	0.9795	0.9572	0.9294	0.8974	0.8625	0.8256	0.7876	0.7490	0.7105

Tabla 8.9: Confiabilidad módulo de sensado de bus CAN y submódulos

8.1.1.5. Sensores de Aceleración - A1 y A2

Para los módulos de sensado de aceleración, se utilizaron placas desarrolladas por otros fabricantes. Afortunadamente, fue posible acceder a los esquemáticos y calcular la confiabilidad de los sistemas. Debido a la falta de información específica en la hoja de datos de los acelerómetros, se asumió una tasa de fallos típica para los acelerómetros de 10 FIT.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_P	π_V	π_{SR}	π_A	π_L	C1	C2	λ_p	λ
Resistencia	8	0.0037	1.3	16	10	1	-	0.17	-	-	-	-	-	-	0.130832	1.046656
Capacitor	4	0.00040	1.6	20	10	-	1.3	-	1	1	-	-	-	-	0.1664	0.6656
Transistor (MOS)	2	0.012	1.6	9	5.5	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	0.66528	1.33056
LDO (IC)	1	-	0.49	4	1	-	-	-	-	-	-	1	0.01	0.0016	0.0113	0.0113
Acelerometro	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
TOTAL																4.054116

Tabla 8.10: Confiabilidad componentes del modulo de aceleración

Confiabilidad modulos de aceleración											
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$R_{A1}(t)$	0.9651	0.9314	0.8989	0.8676	0.8373	0.8081	0.7799	0.7527	0.7264	0.7011	
$R_{A2}(t)$	0.9651	0.9314	0.8989	0.8676	0.8373	0.8081	0.7799	0.7527	0.7264	0.7011	
$R_A(t)$	0.9988	0.9953	0.9898	0.9825	0.9735	0.9632	0.9516	0.9388	0.9252	0.9106	

Tabla 8.11: Confiabilidad módulo de sensado de aceleración y submódulos

8.1.1.6. Unidades de Control - U1 y U2

Se realiza el calculo para la confiabilidad de los diferentes controladores. En la figura 8.12 se puede observar la confiabilidad total del modulo Sin embargo la confiabilidad de la FPGA no pudo ser calculada mediante la norma militar estipulada en consecuencia se realizo una investigacion sobre confiabilidad en FPGAs y se estimo un valor de 1.24FIT aproximadamente.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_C	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	λ_p	λ
Capacitor	3	0.00099	2.9	20	10	0.81	1	1	-	-	-	0.465102	1.3953
Microcontrolador	1	-	0.15	4	10	-	-	-	1	0.54	0.02	1.61	1.6100
TOTAL													3.0053

Tabla 8.12: Confiabilidad modulo ESP32

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_C	π_V	π_{SR}	λ_p	λ
Capacitor	2	0.00099	2.9	20	10	0.81	1	1	0.465102	0.930204
FPGA	1	-	-	-	-	-	-	-	0.00124	0.00124
TOTAL										0.931444

Tabla 8.13: Confiabilidad modulo FPGA Upduino

8.1.1.7. Circuito de Salida - O1 y O2

El circuito de salida es similar para ambos módulos, por lo que el estudio de confiabilidad también será el mismo. En la tabla 8.14 se podrán observar los componentes que conforman el circuito y sus respectivas confiabilidades.

Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_S	π_C	π_A	π_P	π_R	π_{CYC}	π_F	π_L	λ_p	λ
Resistencia	5	0.0037	1.3	16	10	1	-	-	0.58	-	-	-	-	0.446368	2.23184
Diodo	5	0.003	1.4	9	8	0.054	1	-	-	-	-	-	-	0.0163296	0.0816480
Transistor BJT	1	0.00074	1.7	9	8	0.11	-	0.7	-	0.43	-	-	-	0.002998971	0.002998971
Rele	1	0.0098	-	15	2.9	-	1.75	-	-	-	1	3	1.02	2.2828365	2.2828365
Conector	3	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1.104	3.312
TOTAL															7.91132347136

Tabla 8.14: Confiabilidad componentes circuito de salida

Confiabilidad módulos de salida										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{O1}(t)$	0.9330	0.8706	0.8123	0.7579	0.7071	0.6598	0.6156	0.5744	0.5359	0.5001
$R_{O2}(t)$	0.9330	0.8706	0.8123	0.7579	0.7071	0.6598	0.6156	0.5744	0.5359	0.5001

Tabla 8.15: Confiabilidad módulo salida y submódulos

8.1.1.8. Sistema de alimentación - P1

El sistema de alimentación está compuesto por varios subcircuitos de diferentes fabricantes. Inicialmente, será necesario determinar la tasa de fallos de cada uno de estos subcircuitos o, en el peor de los casos, realizar una estimación basada en sus componentes. Es importante notar que el sistema cuenta con redundancia específicamente en la alimentación principal. En la figura 8.2 se puede observar el diagrama de confiabilidad del sistema de alimentación.

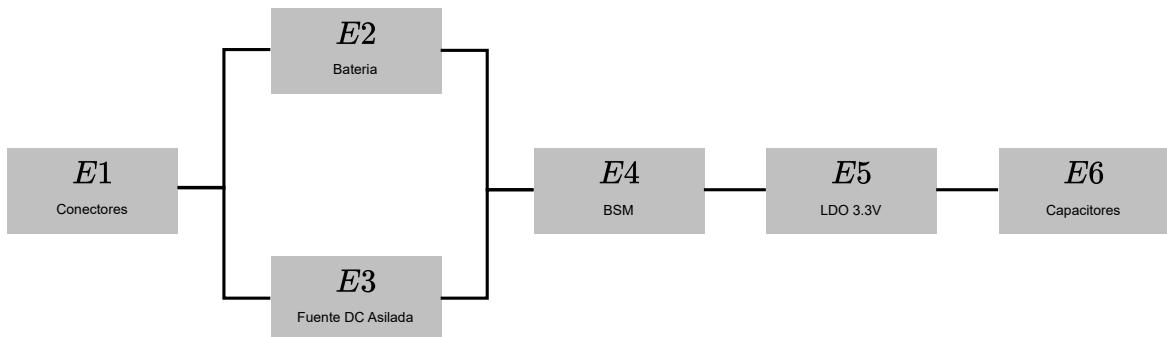


Figura 8.2: Diagrama de Confiabilidad del sistema de alimentación

La fuente DC-DC aislada cuenta con su confiabilidad brindada por el fabricante con un MTBF de 1.000.060 hs. Sin embargo para la batería de respaldo, se tuvo que realizar una investigación de fabricantes similares, ya que la hoja de datos de la batería utilizada no contenía información sobre la confiabilidad. Se encontró que la tasa media entre fallas (MTBF) puede variar entre 100,000 horas y 200,000 horas. Para mantenernos en un lado conservador, se optó por tomar el menor tiempo de MTBF.

En la tabla 8.16 se listan todos los componentes del subsistema y se calculan sus respectivas tasas de falla.

ID	Componente	Cantidad	λ_b	π_T	π_E	π_Q	π_C	π_V	π_{SR}	π_L	C1	C2	π_K	λ_p	λ
E1	Conectores	3	0.046	1.5	8	2	-	-	-	-	-	-	1	1.104	3.312
E2	Fuente DC-DC Aislada	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
E3	Batería	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10
E4	Battery Management System	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	2.4
E5	Regulador de Tension	1	-	0.79	4	10	-	-	-	1	0.01	0.00047	-	0.0978	0.0978
E6	Capacitores	3	0.00099	2.9	20	10	0.81	1	1	-	-	-	-	0.465102	1.395306

Tabla 8.16: Confiabilidad componentes módulo de alimentación

Debido al diagrama de confiabilidad, no es posible simplemente sumar la tasa de fallos de cada uno de los componentes para obtener la confiabilidad total del subsistema. En este caso, se debe respetar la ecuación 8.3 para calcular la confiabilidad del sistema de manera precisa.

$$R_{PWR} = R_1 \cdot (R_2 + R_3 - R_2 \cdot R_3) \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \quad (8.3)$$

Siguiendo la definición de confiabilidad para un modelo exponencial se sabe que la confiabilidad en función del tiempo $R(t)$ sera dada por la ecuación 8.1. Finalmente, se puede observar en la tabla 8.17 la confiabilidad del modulo a lo largo del tiempo.

Confiabilidad modulo de alimentacion										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{E_1}(t)$	0.9714	0.9436	0.9166	0.8904	0.8650	0.8402	0.8162	0.7929	0.7702	0.7482
$R_{E_2}(t)$	0.9913	0.9826	0.9741	0.9656	0.9571	0.9488	0.9405	0.9323	0.9242	0.9161
$R_{E_3}(t)$	0.9161	0.8393	0.7689	0.7044	0.6453	0.5912	0.5416	0.4962	0.4546	0.4164
$R_{E_4}(t)$	0.9792	0.9588	0.9389	0.9193	0.9002	0.8815	0.8631	0.8452	0.8276	0.8104
$R_{E_5}(t)$	0.9991	0.9983	0.9974	0.9966	0.9957	0.9949	0.9940	0.9932	0.9923	0.9915
$R_{E_6}(t)$	0.9879	0.9759	0.9640	0.9523	0.9407	0.9293	0.9180	0.9068	0.8958	0.8849
$R_{P1}(t)$	0.9381	0.8789	0.8225	0.7690	0.7183	0.6704	0.6253	0.5830	0.5432	0.5059

Tabla 8.17: Confiabilidad modulo de alimentación

8.1.1.9. Placa Circuito Impreso - PCB

El circuito impreso también influye significativamente en el cálculo de la confiabilidad del sistema. Generalmente, la confiabilidad del PCB se caracteriza por la cantidad de vías y pads que posee. En la tabla 8.18 se puede observar el estudio de confiabilidad del circuito impreso, mostrando la diferencia entre una placa hecha a mano y una placa realizada de forma automatizada.

Componente	λ_b	N_1	π_C	N_2	π_Q	π_E	λ_p
PCB Hand	0.00011	0	1	600	2	7	12.936
PCB Auto	0.000017	600	1	0	2	7	0.1428

Tabla 8.18: Confiabilidad del circuito impreso

Confiabilidad circuito impreso										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{PCB_H}(t)$	0.8929	0.7972	0.7118	0.6355	0.5675	0.5067	0.4524	0.4039	0.3606	0.3220
$R_{PCB_A}(t)$	0.9987	0.9975	0.9963	0.9950	0.9938	0.9925	0.9913	0.9900	0.9888	0.9876

Tabla 8.19: Confiabilidad circuito impreso

8.1.1.10. Confiabilidad Final

Recordando lo observado en la figura ??, los módulos de sensado de la misma variable se encuentran en paralelo, por lo que es posible calcular su confiabilidad en conjunto y luego generar un bloque de mayor abstracción que se encuentra en serie con el resto de los componentes del sistema. En el caso de las unidades de control y

los circuitos de salida, será necesario calcular la confiabilidad de cada una de las ramas donde se encuentra el módulo de control y el módulo de salida.

Confiabilidad ramas modulo de control y salida en serie										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{UO1}(t)$	0.9991	0.9964	0.9921	0.9864	0.9795	0.9713	0.9622	0.9521	0.9413	0.9297
$R_{UO2}(t)$	0.9997	0.9987	0.9970	0.9949	0.9922	0.9890	0.9854	0.9815	0.9771	0.9724
$R_{UO}(t)$	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9998	0.9997	0.9994	0.9991	0.9987	0.9981

Tabla 8.20: Confiabilidad de la rama donde los modulos de control y salida se encuentran serie

Finalmente se obtiene un diagrama de confiabilidad de todos bloques en serie, con una confiabilidad observada en la tabla ??

Confiabilidad del prototipo										
Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R(t)$	0.9323	0.8438	0.7453	0.6450	0.5486	0.4599	0.3807	0.3117	0.2528	0.2032

Tabla 8.21: Confiabilidad total del prototipo

MTBF [años]	MTBF [horas]
14,29	125.240

Tabla 8.22: Tiempo medio entre fallas

8.1.2. Software

Para el cálculo de la confiabilidad del software, se optó por un método de estimación que modeliza la probabilidad de correcto funcionamiento (ausencia de fallas) a partir de datos relevados durante las etapas de testing del software desarrollado. En particular, en este trabajo se emplea el método de Shooman, cuyo atractivo reside en que modela la confiabilidad como una exponencial decreciente (análogo al modelo utilizado para hardware) y que normaliza las fallas según las líneas de código, independizándose del número de líneas de código utilizadas en el proyecto.

El método de Shooman modeliza la confiabilidad de acuerdo con la ecuación:

$$R(t) = e^{-k \cdot (\epsilon_T - \epsilon_C(\zeta)) \cdot t}$$

Donde, si se considera $\lambda = k \cdot (\epsilon_T - \epsilon_C(\zeta))$, se puede relacionar este modelo con el utilizado en hardware. En este caso, ϵ_T representa la tasa de fallas totales en el software durante el período de testing, mientras que $\epsilon_C(\zeta)$ determina la tasa de fallas corregidas hasta el tiempo ζ . Para el presente trabajo, el período de testing tomó cuatro semanas, que comprende desde el 01/06/2024 al 28/06/2024, y se divide en períodos de 4 días.

Día	ED	EC	EDA	ECA	ER	Hs	λ	\hat{E}_T	\hat{k}
01/06/24	6	5	6	5	1	96	0.052	-	-
05/06/24	4	4	10	9	1	192	0.047	72.923	0.735
09/06/24	2	2	12	11	1	288	0.038	40.553	1.286
13/06/24	2	2	14	13	1	384	0.034	50.632	0.903
17/06/24	1	1	15	14	1	480	0.029	28.412	2.012
21/06/24	0	0	15	14	1	576	0.024	0.000	-1.714
25/06/24	0	0	15	14	1	672	0.021	0.000	-1.500

Tabla 8.23: Relevamiento de fallas detectadas y corregidas del software durante el período de testing.

La Tabla 8.23 muestra el número de fallas detectadas en el software (ED) y cuántas de ellas fueron corregidas (EC) en períodos de tiempo de [Número de días] días. Las columnas siguientes, EDA, ECA y ER contienen los valores acumulados de errores detectados, corregidos y errores residuales, respectivamente.

El cociente entre los errores corregidos acumulados (ECA) y el tiempo transcurrido en horas, determina el valor de λ , el cual es luego utilizado para el estimador de \hat{E}_T , dada la ecuación:

$$\hat{E}_{Ti} = \frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}} \cdot \frac{ECA_{i-1} - ECA_i}{\lambda_i / (\lambda_{i-1} - 1)}$$

Finalmente, se estima \hat{k} mediante:

$$\hat{k}_i = \lambda_i \cdot \frac{I_T}{\hat{E}_{Ti} - ECA_i}$$

donde I_T es un parámetro para indicar la cantidad de instrucciones del software.

En el modelo de Shooman, el parámetro λ del sistema completo puede ser estimado con:

$$\lambda = k \cdot \frac{E_R}{I_T} \approx 0.00002$$

tomando el último valor de ER de la Tabla 8.23. Y del inverso de este valor se obtiene:

$$MTTF \approx 47619 \text{ hrs}$$

Es importante recalcar que el software no presenta desgaste físico, por lo que estas horas son horas netas de uso. Esto significa que, para 4 horas de uso por día, se estima una falla cada 11900 días aproximadamente, es decir, cada 30 años. Se pudo lograr un resultado tan bueno ya que el código completo, tanto para la FPGA como para la ESP32, esta compuesto de pocas líneas relativamente simples, además de tener la redundancia dada por implementar dos sistemas de control completamente distintos.

9. Conclusiones

9.1. Cumplimiento de Objetivos

En retrospectiva, los objetivos planteados al inicio de este trabajo han sido alcanzados de manera altamente satisfactoria. Los desafíos afrontados, en múltiples ocasiones, han implicado trabajar en el límite de las capacidades tecnológicas disponibles, lo que da un valor añadido a las soluciones propuestas. Aunque este diseño no está exento de fallas y ciertamente hay mejoras que se pueden implementar en desarrollos futuros, los logros alcanzados son significativos. En resumen, los objetivos fueron cumplidos de manera satisfactoria.

9.2. Lecciones Aprendidas

El desarrollo de este proyecto ha dejado numerosas enseñanzas para los participantes. Una de las primeras lecciones aprendidas está relacionada con la necesidad de conocimientos multidisciplinarios a la hora de innovar. En este diseño en particular, esto se hizo especialmente evidente en los aspectos relacionados con la electrónica y la programación, donde la integración de múltiples componentes y tecnologías fue crucial. Por ejemplo, la elección de sensores de diferentes tecnologías para agregar redundancia y la implementación de módulos de protección demostraron la importancia de una planificación cuidadosa y de una amplia gama de conocimientos técnicos.

Otra lección importante tiene que ver con la importancia de la confiabilidad y la robustez del sistema. El uso de métodos de estimación de confiabilidad, como el método de Shooman, permitió modelar y mejorar la probabilidad de correcto funcionamiento del software. Además, la implementación de mecanismos de protección redundantes y la elección de componentes comerciales confiables aseguraron un diseño robusto y seguro.

9.3. Recomendaciones para Futuros Diseños

La principal recomendación para futuros proyectos de diseño es la inversión de tiempo en pruebas de concepto, especialmente en productos que desafíen las barreras de la tecnología existente. En este trabajo, la realización temprana de estudios de viabilidad y pruebas de los módulos fue crucial para el éxito del proyecto. Se aconseja dedicar más tiempo formalmente a este proceso para probar también aspectos de la integración de los módulos. Además, es recomendable considerar la escalabilidad y la facilidad de manufactura desde las primeras etapas del diseño.

Finalmente, se sugiere a futuros desarrolladores mantener una comunicación constante con los proveedores de componentes y estar al tanto de las novedades tecnológicas, lo cual puede abrir nuevas oportunidades para mejorar y optimizar los diseños. La experiencia obtenida en este proyecto será de gran utilidad para enfrentar futuros desafíos en el campo del diseño de sistemas de protección para vehículos eléctricos y otros desarrollos tecnológicos.

10. Referencias

1. Johnson J., Kola Y. (2017). *Design, modeling and developing of a go-kart vehicle*. IEEE AMIAMS. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/amiams.2017.8069197>.
2. Saheb S.H., Reddy G., Hameed M. (2016). *Design report of a go-kart vehicle*. International Journal of Engineering and Advanced Science Technology (IJEAST), 2455-2143.
3. Singh H., Sagar P., Singh K. (2016). *Development of electric go-kart*. SAE Technical Paper 2016-28-0149. Disponible en: <https://doi.org/10.4271/2016-28-0149>.
4. Saini N.K., Rana R., Hassan M.N., Goswami K. (2019). *Design and impact analysis of Go-kart chassis*. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 0973-4562.
5. Manish K.K. (2017). *Design failure modes and effects analysis of an electric kart*. Bachelor in Technology, Department Of Mechanical Engineering, College Of Engineering and Technology, Odisha.
6. Davis E.M. (2012). *Design and performance evaluation of an electric Go-Kart and custom permanent magnet brushless DC*.
7. Raghunandan D., Pandiyan A., Majeed S. (2016). *Design and analysis of go-kart chassis*. International Journal of Engineering Sciences Research Technology (IJESRT), 2277-9655.
8. Abhijeet P.B., Boobesh S. (2019). *Design and implementation of electric go-kart vehicle*. International Journal of Advanced Research in Innovative Ideas in Education (IJARIE), 5(2), 2395-4396.
9. Lal K., Abhishek O.S. (2017). *Design, analysis and fabrication of GO-KART*. International Journal of Science and Engineering Research (IJSER), 429-434.
10. Sahu A., Panda M.R., Ranjan S., Khara M., Senapati S.R., Parida S., Rao B. (2020). *Design and analysis of electric Go-Kart chassis*. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 4739-4745.
11. Kanherkar K.L. (2017). *Design and analysis of a GO-KART*. Journal of Materials Science and Mechanical Engineering (JMSME), 198-201.
12. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2020). *Vehicle Safety Research*. Disponible en: <https://www.nhtsa.gov/vehicle-safety-research>.
13. Safercar.gov. (2020). *Crash Compatibility for Occupantless Delivery Vehicles*. NHTSA. Disponible en: <https://www.nhtsa.gov/research-data/crash-compatibility-occupantless-delivery-vehicles>.
14. SpringerLink. (2021). *A Systematic Risk Assessment Framework of Automotive Cybersecurity*. Automotive Innovation. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42154-021-00088-8>.
15. SAE International. (2019). *Advanced Driver Assistance Systems: An Analysis of Pedestrian Protection Systems and Automatic Emergency Braking in the Modern Automobile*. Disponible en: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2019-01-0120/>.
16. Texas Instruments. (2022). *Isolated Current and Voltage Sensing*. Nota de aplicación. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/an/slyt791/slyt791.pdf>.
17. Analog Devices. (2021). *Designing High Performance Isolated Voltage Sensing Circuits*. Nota de aplicación. Disponible en: <https://www.analog.com/en/technical-articles/designing-high-performance-isolated-voltage-sensing-circuits.html>.

11. Anexos Técnicos

11.1. Esquemáticos

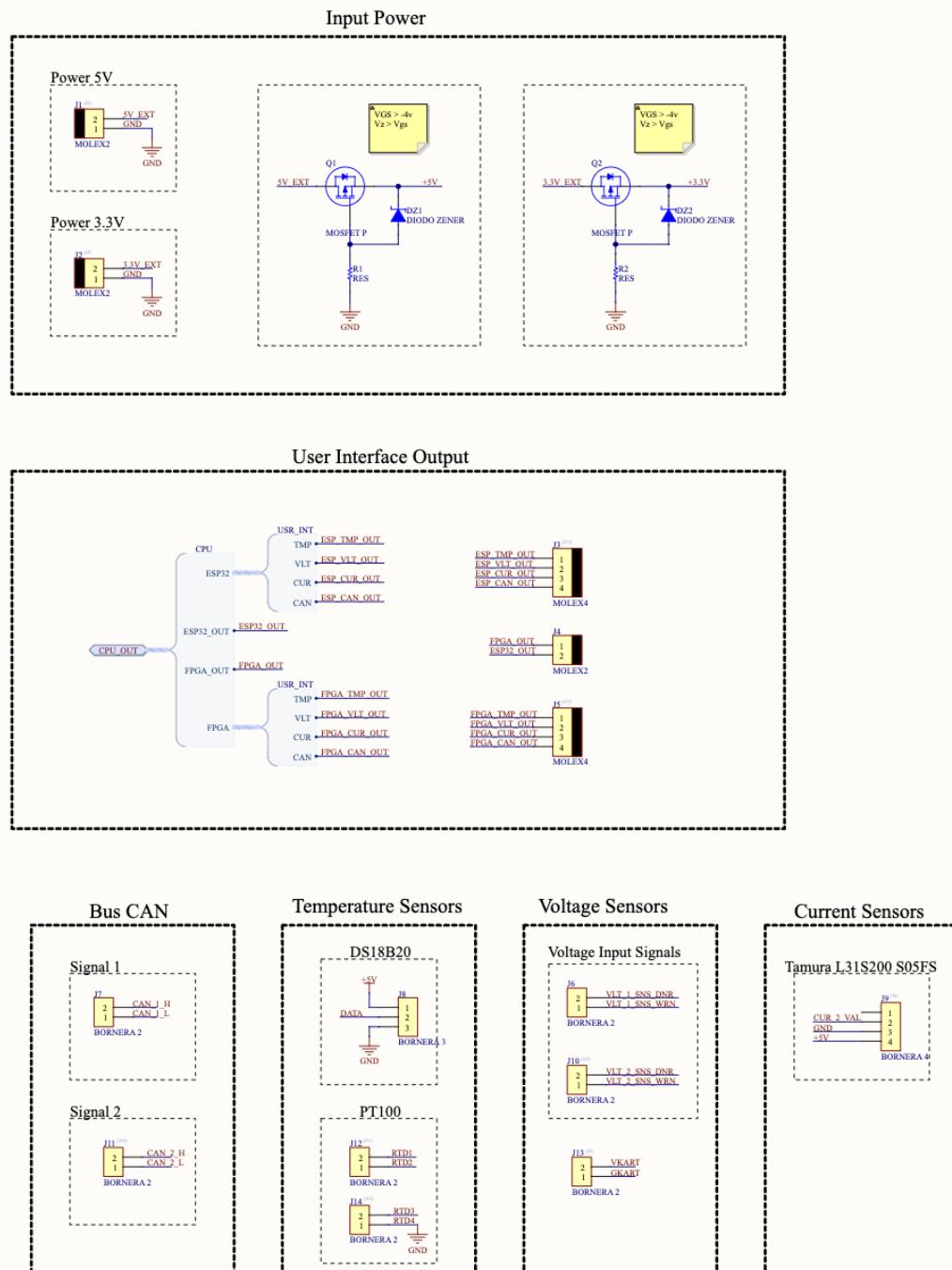
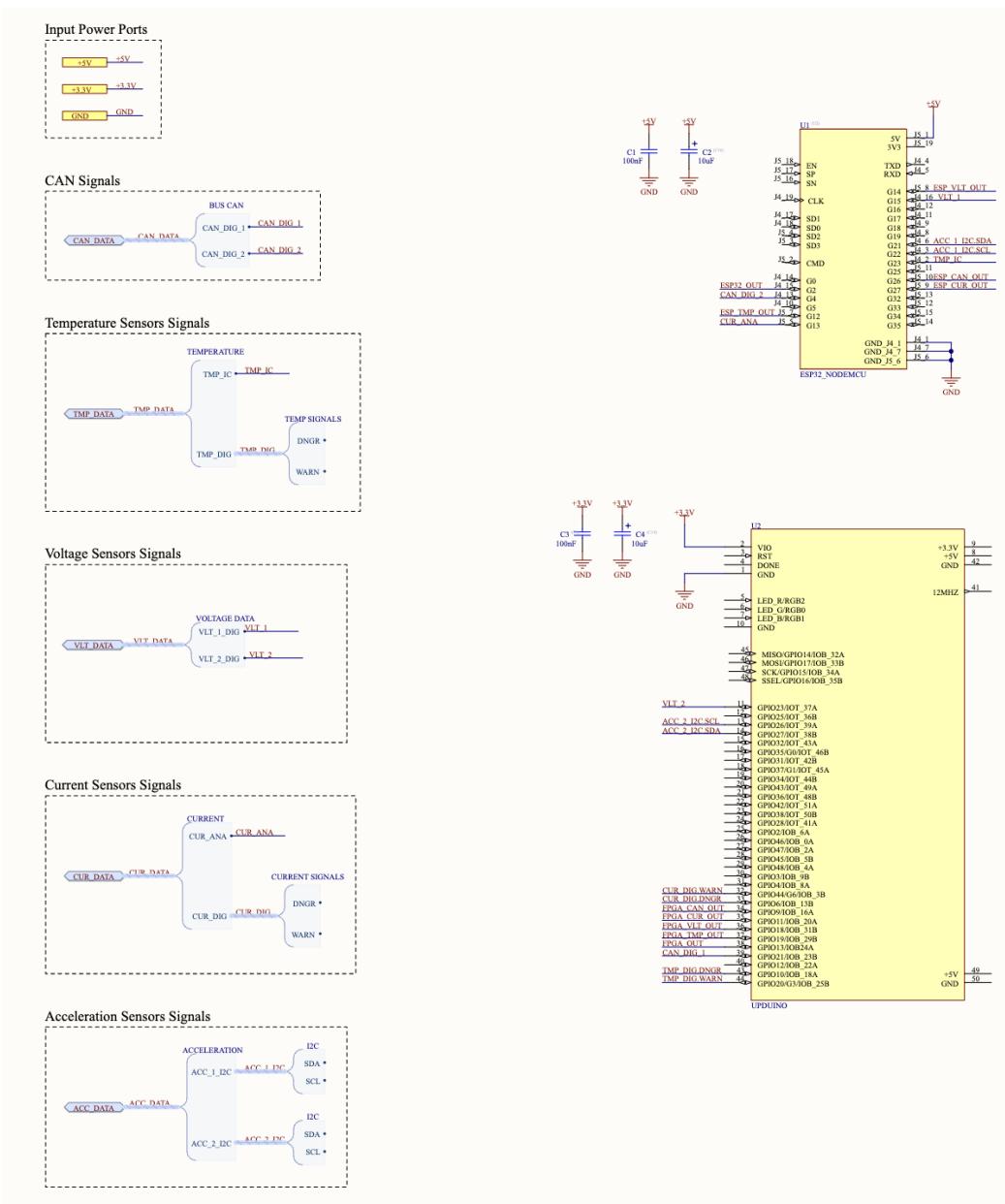


Figura 11.1: Esquematico Mainboard.



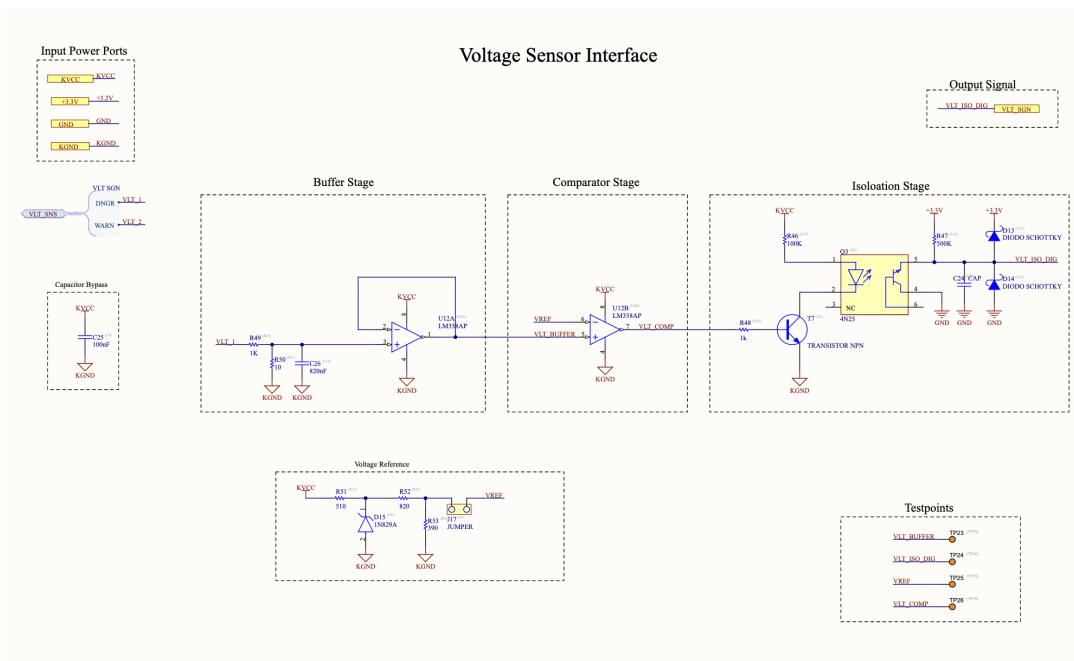


Figura 11.3: Esquematico sensor de tensión.

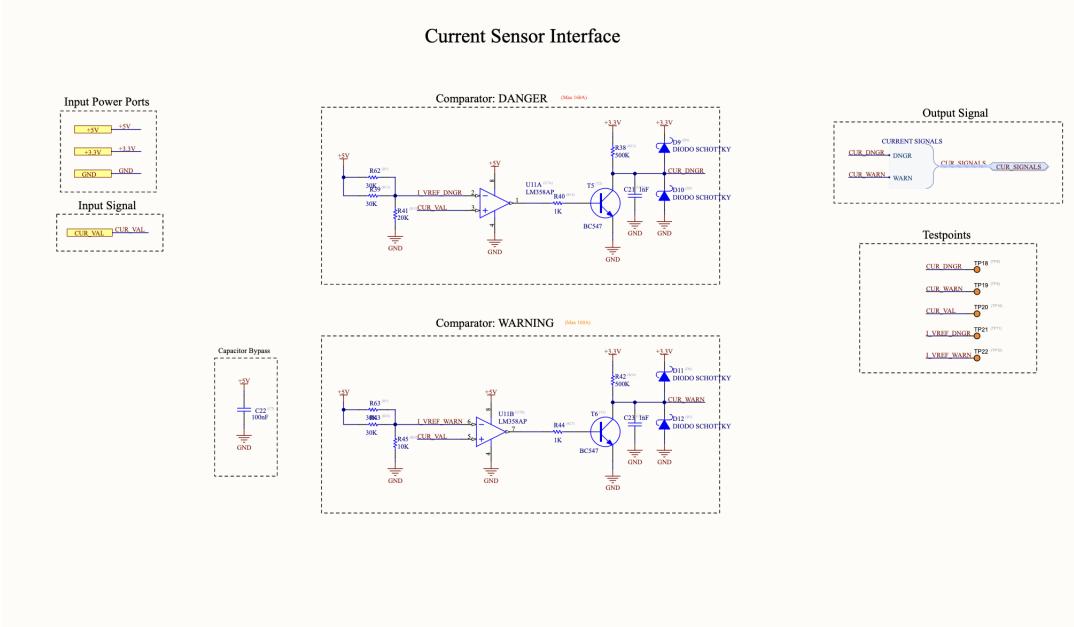


Figura 11.4: Esquematico sensor de corriente 1.

Current Sensor Interface

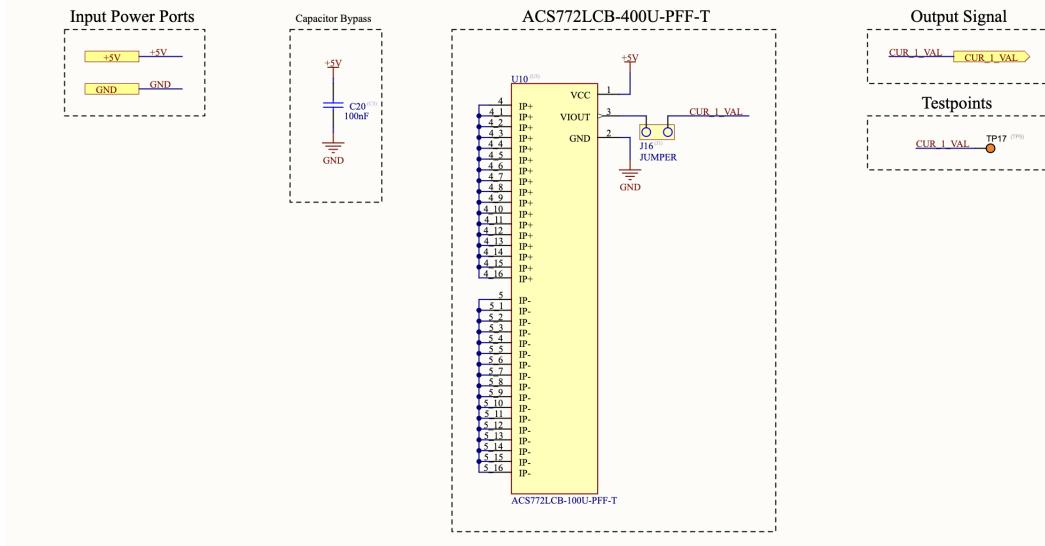


Figura 11.5: Esquematico sensor de corriente 2.

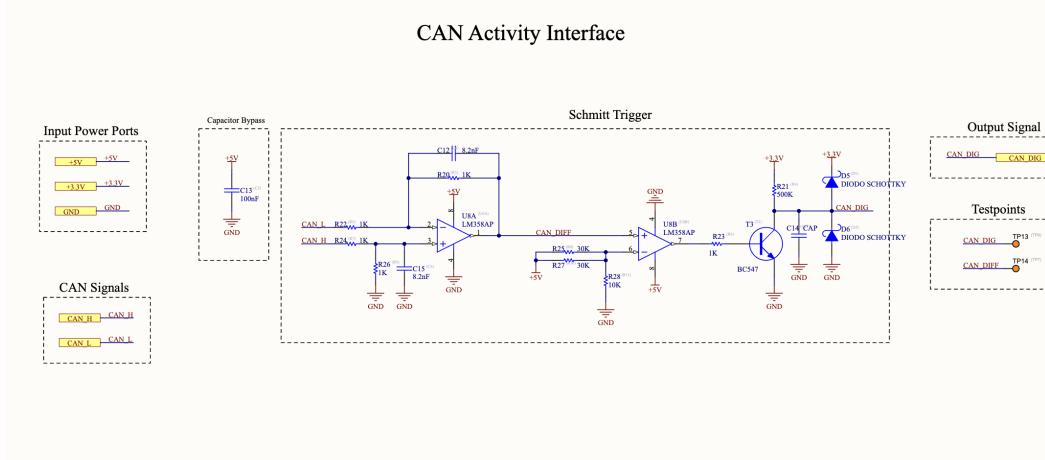


Figura 11.6: Esquematico de conexión al CAN

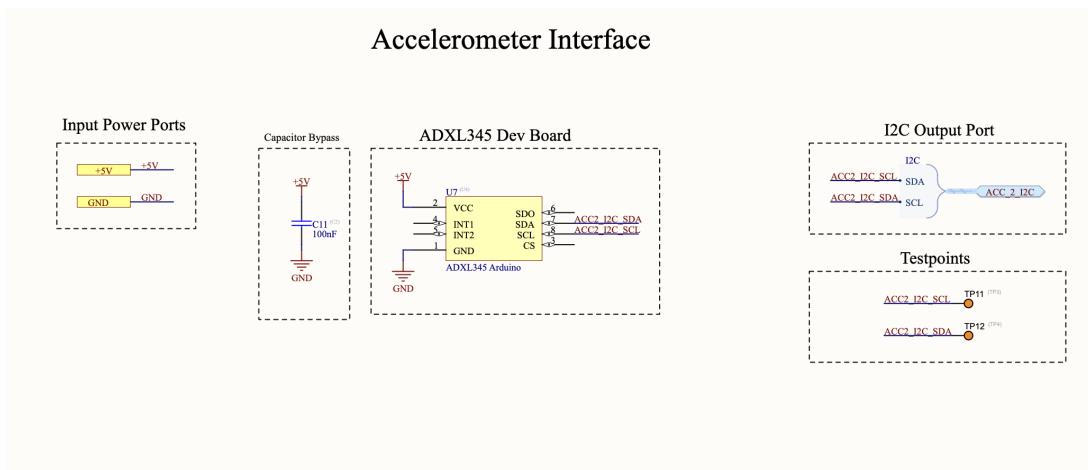


Figura 11.7: Esquematico acelerómetro 1.

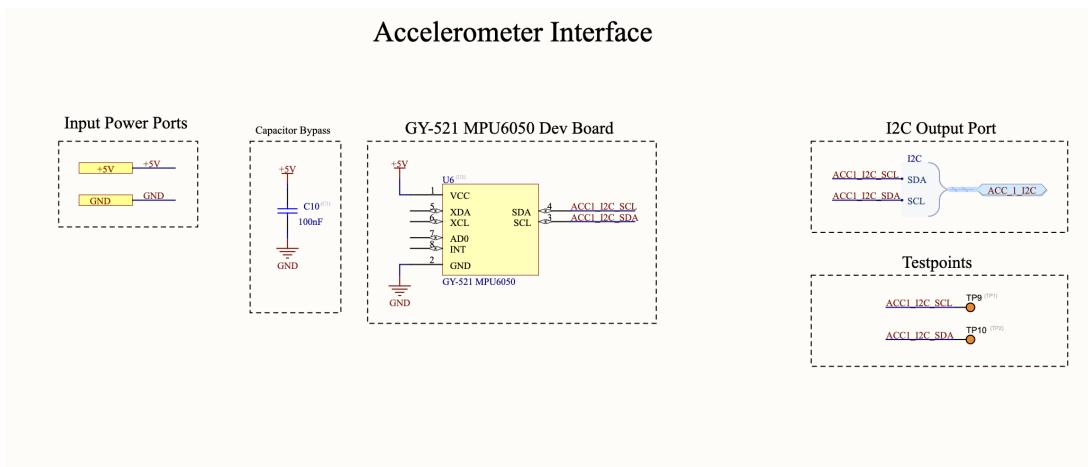


Figura 11.8: Esquematico acelerómetro 2.

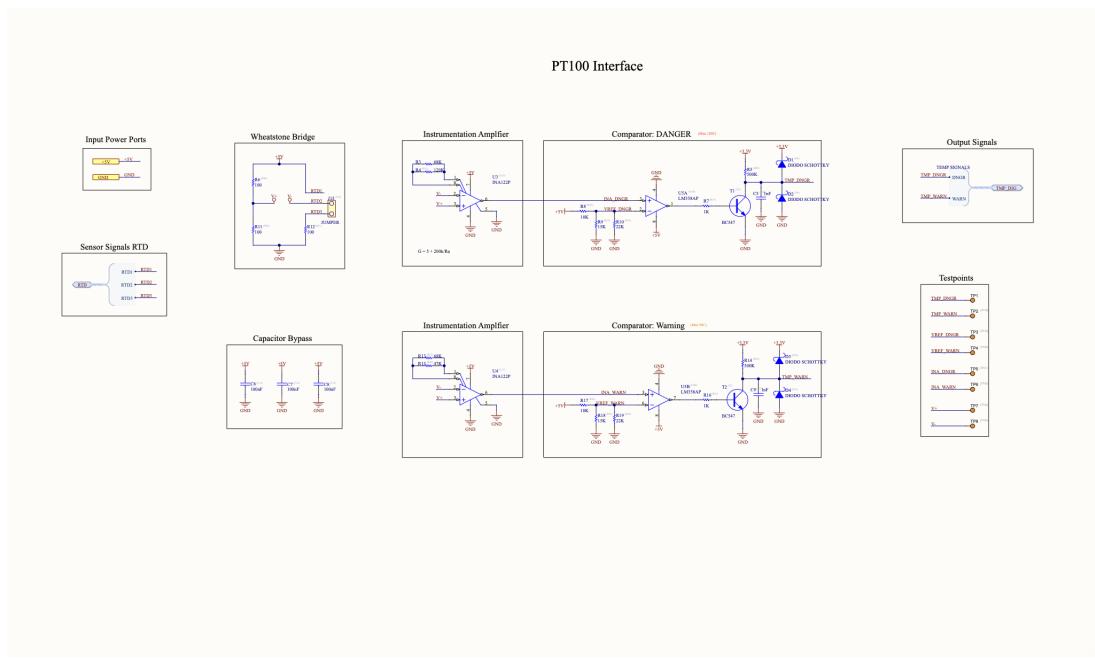


Figura 11.9: Esquematico sensor de temperatura.

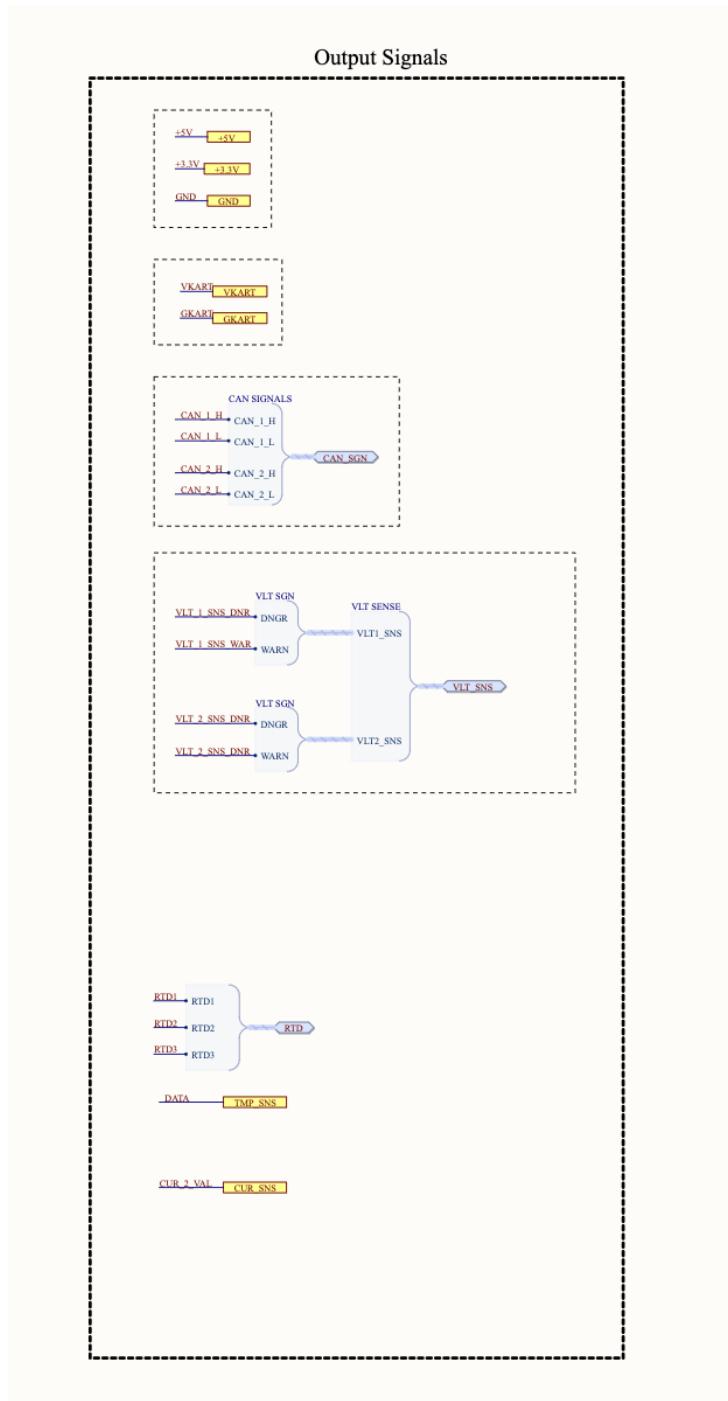


Figura 11.10: Esquematico señales de salida.

11.2. Planos de PCB

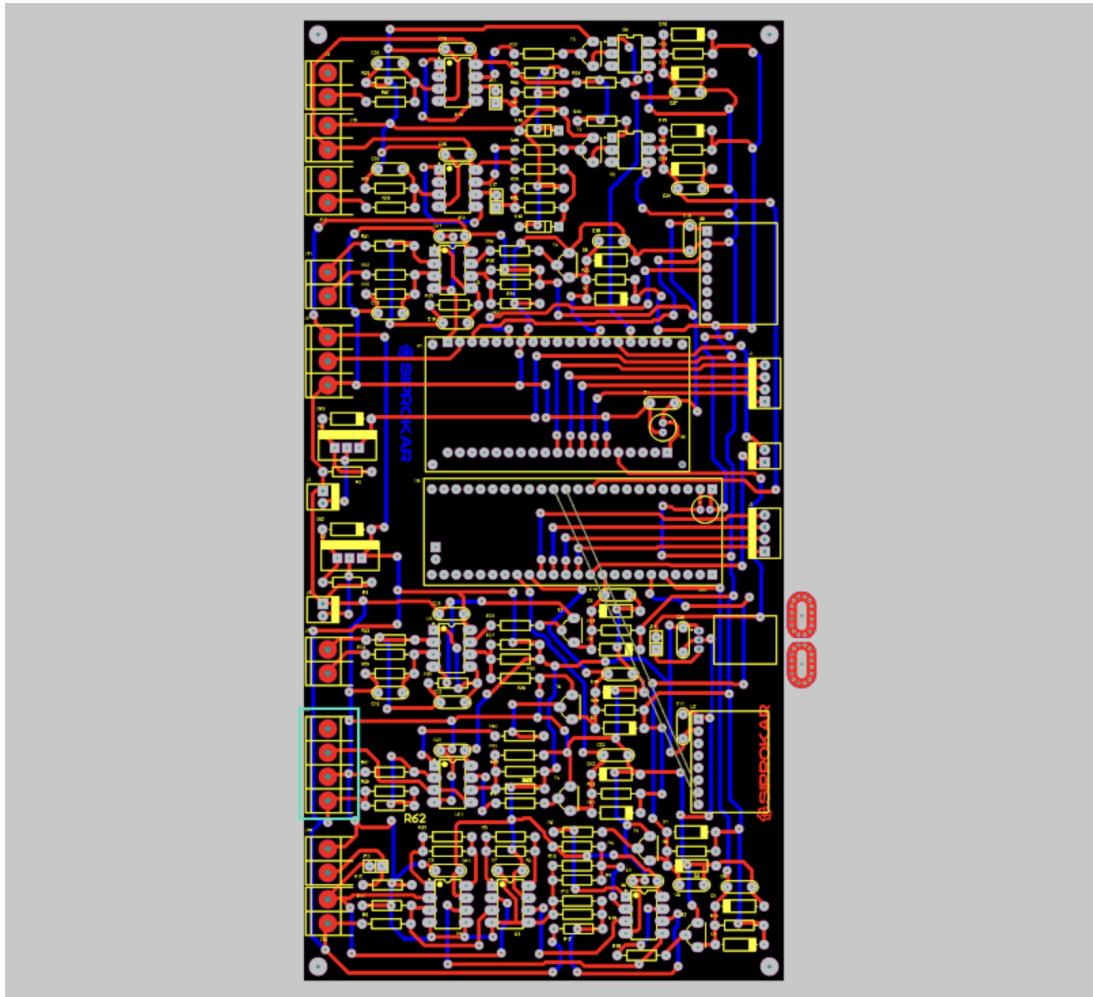


Figura 11.11: PCB Mainboard.

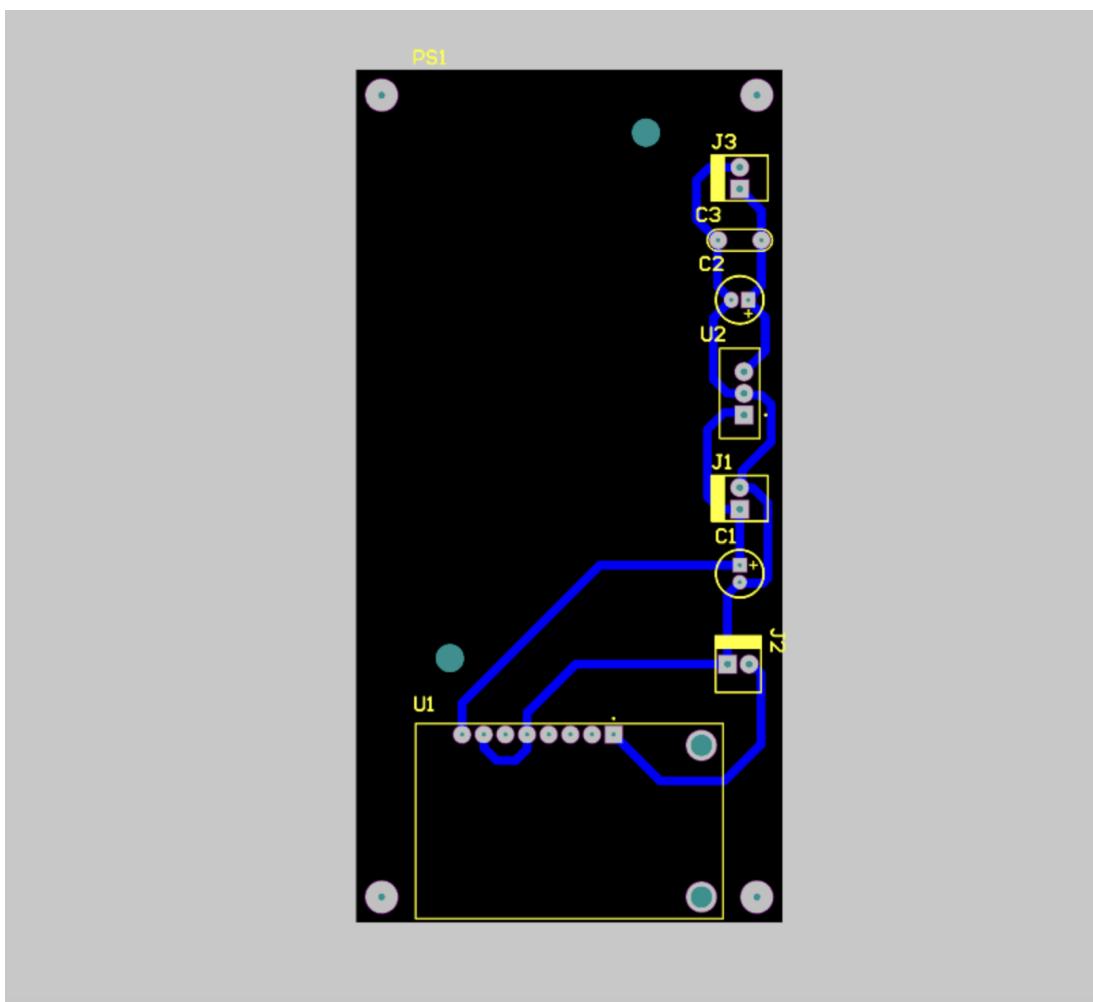


Figura 11.12: PCB Power Delivery Unit.

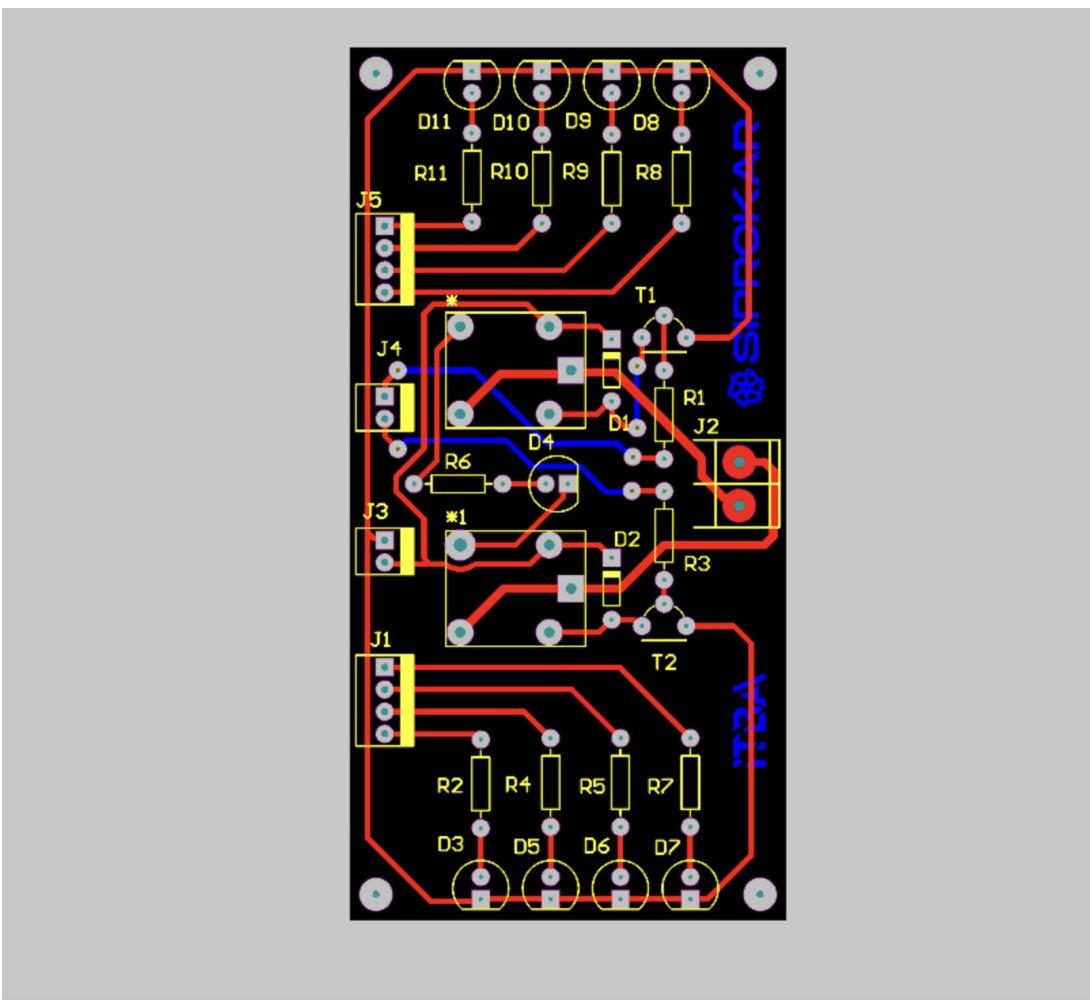


Figura 11.13: PCB Output.

11.3. Listado de Partes y Componentes (BOM)

Dispositivo / Elemento	Valor	Cantidad	Descripción
Capacitor Cerámico	820 nF	2	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	8.2 nF	4	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	100 nF	11	Capacitor de desacople / Filtros
Capacitor Cerámico	1 nF	4	Capacitor de desacople / Filtros
1N5819	-	19	Diodo Schottky
1N4735A	-	1	Diodo Zener 6.2V
BZX55C6V2	-	1	Diodo Zener 6.2V
MOLEX	2	3	-
MOLEX	4	2	-
Bornera	2	7	-
Bornera	3	1	-
Bornera	4	1	-
Jumper	-	4	-
MOSFET P	-	2	Protección de Batería
4N35	-	1	Optoacoplador
PC817	-	1	Optoacoplador
BC547C	-	4	NPN
2N3904	-	4	NPN
Test Points	.	30	-
ESP32_NODEMCU	-	1	-
UPDUINO	-	1	-
INA122P	-	2	Amplificador de Instrumentación
LM358AP	-	3	Amplificador Operacional
TLV237	-	3	Amplificador Operacional
Resistencia	100 Ω	4	1/4 W, 1 %
Resistencia	10k Ω	5	1/4 W, 1 %
Resistencia	412 kΩ	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	100 kΩ	10	1/4 W, 1 %
Resistencia	18k Ω	1	1/4 W, 1 %

Tabla 11.1: Lista de Materiales (BOM)

Dispositivo / Elemento	Valor	Cantidad	Descripción
Resistencia	1k Ω	7	1/4 W, 1 %
Resistencia	510 k Ω	10	1/4 W, 1 %
Resistencia	510 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	820 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	390 Ω	2	1/4 W, 1 %
Resistencia	20 k Ω	4	1/4 W, 1 %
Resistencia	30 k Ω	4	1/4 W, 1 %
PYBE20-Q24-S5-T	-	1	Conversor DC-DC aislado, input 9V a 36V, output 5V, 20W max
PowerBoost 1000 C	-	1	Battery Management System con passthrough, 1A, Adafruit
LMS1587	3.3V	1	LDO de 5V a 3.3, 5A max
Capacitor	100uF	1	Cerámico
Capacitor	10uF	2	Electrolítico
Molex 2 pin	-	3	-

Tabla 11.2: Lista de Materiales (BOM) - 2

11.4. Códigos de Software

11.4.1. FPGA

```
module protector(gpio_36, gpio_32, gpio_31, gpio_28, gpio_47, gpio_46, gpio_27, gpio_26, gpio_21);

// Inputs:
input wire gpio_36, gpio_32, gpio_31, gpio_28, gpio_47, gpio_46, gpio_27, gpio_26;

// Output:
output wire gpio_21;

parameter MAX_ACC = 16'h0FFF; // Maximum acceleration allowed
parameter CLK_FREQ = 10000; // Low speed internal oscillator frequency

// Initialize registers:
reg WARN_TO_DANGER = 0;
reg [31:0] current_counter = 0;
reg [31:0] temp_counter = 0;
reg [31:0] can_counter = 0;
reg previous_can_value = 0;
reg [15:0] accelerometer_value = 0;

// Give names to the inputs:
wire CAN = gpio_36;
wire VOLT_DGR = gpio_32;
wire CURR_WARN = gpio_31;
wire CURR_DGR = gpio_28;
wire TEMP_WARN = gpio_47;
```

```

wire TEMP_DGR = gpio_46;
wire SDA = gpio_27;
wire SCL = gpio_26;

// Initialize trigger and assign it to the output:
reg TRIGGER = 0;
assign gpio_21 = TRIGGER;

// Initialize oscillator:
wire int_lfosc;
SB_LFOSC u_SB_LFOSC(.CLKLFPU(1'b1), .CLKLFEN(1'b1), .CLKLF(int_lfosc));
// Low frequency oscillator (LF, 10kHz)

// Combinational logic to trigger instantaneously if any values are in the danger zone
always@(VOLT_DGR or CURR_DGR or TEMP_DGR or WARN_TO_DANGER) begin
    if ((VOLT_DGR == 1) || (CURR_DGR == 1) || (TEMP_DGR == 1) || (WARN_TO_DANGER == 1))
        TRIGGER <= 1;
    else
        TRIGGER <= 0;
end

// Each clock cycle (or if the reset pin has been activated)
always@(posedge int_lfosc) begin

    // Add one to the counter of any activated warning signals
    if (CURR_WARN == 1)
        current_counter <= current_counter + 1;
    else
        current_counter <= 0;

    if (TEMP_WARN == 1)
        temp_counter <= temp_counter + 1;
    else
        temp_counter <= 0;

    if (CAN != previous_can_value) begin
        can_counter <= 0;
        previous_can_value <= CAN;
    end
    else begin
        can_counter <= can_counter + 1;
    end

    // Check to see if we should activate the danger signal
    if (current_counter >= 5*CLK_FREQ
    || temp_counter >= 5*CLK_FREQ || can_counter >= 10*CLK_FREQ) begin
        WARN_TO_DANGER <= 1;
    end
    else begin
        WARN_TO_DANGER <= 0;
    end
end
endmodule

```

11.4.2. Microporcesador

```
// Includes
#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Constantes

#define MAX_INV_T 120 // °C
#define INT_INV_T 90 // °C

#define MAX_INV_I 1.6 // V
#define INT_INV_I 1 // V

#define CAN_MS 1000 // ms
#define INV_I_MS 5000 // ms
#define INV_T_MS 5000 // ms

#define MAX_AC 1 // 1G

// Definición de pines
#define CAN_PIN 34
#define BATTERY_VOLTAGE_PIN 35
#define INVERTER_CURRENT_PIN 32
#define TEMPERATURE_PIN 5
#define ACC_I2C_SDA 21
#define ACC_I2C_SCK 22
#define OUTPUT_PIN 4

// Instancia sensor de aceleración MPU6050

MPU6050 mpu;

// Instancia sensor de temperatura 18B20

OneWire oneWire(TEMPERATURE_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Variables para temporización
unsigned long lastTempTime = 0;
unsigned long lastCurrentTime = 0;

void setup() {
    // Iniciar la comunicación serial
    Serial.begin(115200);

    // Configuración del sensor de aceleración
    Wire.begin(ACC_I2C_SDA, ACC_I2C_SCK); // SDA, SCL
    mpu.initialize();

    // Configuración del sensor de temperatura
    sensors.begin();

    // Configuración pines analógicos y digitales de entrada
```

```

pinMode(CAN_PIN, INPUT);
pinMode(BATTERY_VOLTAGE_PIN, INPUT);
pinMode(INVERTER_CURRENT_PIN, INPUT);

// Configuración salida
pinMode(OUTPUT_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(OUTPUT_PIN, LOW);
}

void loop() {
    // Leer valor digital del bus CAN
    int canValue = digitalRead(CAN_PIN);
    Serial.print("CAN Value: ");
    Serial.println(canValue);

    // Leer valor digital de la tensión de batería
    int batValue = digitalRead(BATTERY_VOLTAGE_PIN);
    Serial.print("Battery Value: ");
    Serial.println(batValue);

    // Leer valor analógico del pin INVERTER_CURRENT_PIN y convertirlo a tensión
    int inverterCurrentRaw = analogRead(INVERTER_CURRENT_PIN);
    float inverterCurrentVoltage = inverterCurrentRaw * 3.3 / 4095;
    Serial.print("Inverter Current Voltage: ");
    Serial.println(inverterCurrentVoltage);

    // Leer valor de aceleración
    int16_t ax, ay, az;
    int16_t gx, gy, gz;
    mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);

    // Leer valor de temperatura
    sensors.requestTemperatures();
    float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
    Serial.print("Temperature is: ");
    Serial.println(temperatureC);

    // Calcular magnitud de la aceleración
    float acceleration = sqrt(ax * ax + ay * ay + az * az) / 16384.0; // Convertir a Gs
    Serial.print("Acceleration is: ");
    Serial.println(acceleration);

    // Condiciones para poner la salida en alto
    if (canValue == LOW ||
        batValue == LOW ||
        temperatureC > MAX_INV_T ||
        inverterCurrentVoltage > MAX_INV_I ||
        acceleration > MAX_AC) {
        digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
    } else {
        // Verificación de condiciones temporizadas
        unsigned long currentTime = millis();

        // Condición de temperatura alta por tiempo prolongado
        if (temperatureC > INT_INV_T) {
            if (currentTime - lastTempTime >= INV_T_MS) {

```

```
        digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
    }
} else {
    lastTempTime = currentTime; // Reset del contador
}

// Condición de corriente alta por tiempo prolongado
if (inverterCurrentVoltage > INT_INV_I) {
    if (currentTime - lastCurrentTime >= INV_I_MS) {
        digitalWrite(OUTPUT_PIN, HIGH);
    }
} else {
    lastCurrentTime = currentTime; // Reset del contador
}
}
```