

Robot Sumo de 3 kg: Anteproyecto

César Alejandro Tolentino Mendoza,

Carlos Daniel Barrera Carrillo,

Aitor Sebastián Larios Cuevas

Ingeniería en Sistemas Electrónicos y de Telecomunicaciones

Universidad de Colima

Asesor: Mtro. Alejandro Regalado Escobedo

I. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La robótica de competencia representa un espacio formativo único en el que convergen diversas áreas de la ingeniería, como electrónica, mecánica, control y programación. Entre las modalidades más populares se encuentra el **robot sumo**, donde dos o más robots se enfrentan en un *dohyo* con el objetivo de expulsar al contrincante sin abandonar ellos mismos la pista de combate. En la categoría de 3 kg, los participantes deben asegurar que sus prototipos cumplan requisitos estrictos de masa y dimensiones, así como demostrar un alto rendimiento en empuje y maniobrabilidad.

El presente anteproyecto describe la concepción de un **robot sumo de 3 kg** denominado **Caquinezito**, diseñado para participar en competencias nacionales organizadas por la Universidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (**UPIITA**) del Instituto Politécnico Nacional (**IPN**). El proyecto es desarrollado por el **Equipo de Carbones Calavera "La Resurrección"**. La estructura central de la propuesta se basa en la combinación de:

- Un **microcontrolador PIC18F4550**, encargado de la gestión de sensores y la ejecución de estrategias de control (p. ej., algoritmos PID).
- Una **FPGA Basys2**, destinada a la generación de señales PWM de alta precisión, liberando al microcontrolador de tareas de modulación.
- Un **driver BTS7960** para el manejo de los motores de potencia, con la capacidad de suministrar corrientes elevadas requeridas en las embestidas características de la disciplina.

I-A. Motivación y Contexto Académico

Este proyecto surge de la necesidad de impulsar a estudiantes de Ingeniería en Sistemas Electrónicos y de Telecomunicaciones a integrar conocimientos adquiridos durante su formación. La participación en torneos de robots sumo, particularmente en la categoría de 3 kg, promueve:

1. La experimentación práctica de principios de electrónica analógica y digital.
2. El desarrollo de destrezas en programación de bajo nivel y dispositivos lógicos programables.
3. El diseño mecánico enfocado en la optimización de peso y resistencia al impacto.

4. El análisis de factibilidad financiera y la gestión de recursos, indispensables en proyectos de ingeniería complejos.

I-B. Resumen de las Normas de la Competencia UPIITA

En competencias organizadas por la UPIITA (IPN), se establecen lineamientos estrictos para asegurar la equidad y la calidad técnica de los enfrentamientos. De manera general, las reglas contemplan:

- **Dimensiones y Peso:** El robot debe pesar un máximo de 3 kg y ajustarse a las dimensiones establecidas al inicio (por lo general, 20 cm × 20 cm, sin restricciones de altura).
- **Zona de Combate (Dohyo):** Es un círculo con un diámetro específico (por ejemplo, alrededor de 154 cm) con un borde blanco. Abandonar esta zona implica la eliminación inmediata.
- **Tiempo de Combate:** Cada ronda suele durar un máximo de tres minutos. Si ninguno de los robots es expulsado, se determinan criterios adicionales para definir el ganador.
- **Prohibiciones Técnicas:** No se permite el uso de sustancias que se adhieran al dohyo para mejorar la tracción. Tampoco se autoriza interferir con señales de oponentes o utilizar sistemas de RF no permitidos durante el combate.

Estas normas guían las decisiones de diseño a nivel mecánico, electrónico y de control, pues se requiere una construcción lo bastante robusta como para brindar un alto torque y empuje contra el rival, mientras se conserva una estabilidad que impida que el robot sea empujado fuera del dohyo. Asimismo, la detección de la línea blanca es un factor crítico: cualquier retraso o imprecisión en la lectura de sensores IR o de distancia puede ocasionar la descalificación.

I-C. Imagen Ilustrativa de un Robot Sumo

A fin de contextualizar la apariencia y configuración habitual de estos robots, en la Figura 1 se muestra un ejemplo de prototipo que cumple con los lineamientos de peso y tamaño típicos de la categoría de 3 kg.



Figura 1. Ejemplo ilustrativo de un robot sumo, mostrando la tracción trasera y un diseño frontal inclinado para facilitar el empuje.

A diferencia de otros robots de competencia, Caquineitor opera de manera autónoma, basándose en sus sensores de detección de líneas y oponentes para decidir sus movimientos. De esta forma, el diseño del firmware y la lógica de control son piezas fundamentales del éxito en el dohyo.

I-D. Estructura General de Este Documento

El presente informe se encuentra organizado en capítulos para facilitar su lectura y análisis. La nueva estructura es la siguiente:

- **Capítulo 1 – Introducción.**
- **Capítulo 2 – Planeación.**
- **Capítulo 3 – Análisis Financiero / Presupuestal.**
- **Capítulo 4 – Diseño del Robot (Mecánico y Electrónico).**
- **Capítulo 5 – Lógica de Control y Protocolos de Comunicación.**
- **Capítulo 6 – Posible Implementación Modular de Comunicación Inalámbrica.**
- **Capítulo 7 – Implementaciones Futuras.**
- **Capítulo 8 – Integración del Bootloader y Avances en Programación.**
- **Capítulo 9 – Conclusión y Bibliografía.**

I-E. Relevancia e Impacto Esperado

El proyecto no solo busca triunfar en competencias de sumo robótico, sino también constituir un prototipo pedagógico que permita a otros estudiantes y equipos mejorar sus destrezas en hardware y software. La experiencia acumulada en temas de control, electrónica de potencia, diseño mecánico y administración de recursos económicos se convierte en una aportación a la formación integral de los futuros ingenieros.

En los siguientes capítulos se profundizará en la metodología de planeación y se documentarán los pasos específicos para llevar a buen término la construcción de Caquineitor, siempre alineados a las reglas y exigencias de la competencia UPIITA del IPN.

II. CAPÍTULO 2: PLANEACIÓN

En este capítulo se detallan los aspectos clave de la planeación del robot sumo de 3 kg, incluyendo la **justificación de los componentes** seleccionados, el **presupuesto inicial** y

la **elección del microcontrolador PIC18F4550** y la familia PIC18 para el control principal. El objetivo es consolidar un sistema robusto que priorice la potencia de empuje, sin descuidar la maniobrabilidad ni la integración de sensores.

II-A. Justificación de los Componentes Principales

La elección de cada componente responde a la necesidad de equilibrar **alto empuje**, maniobrabilidad y fiabilidad en el dohyo, cumpliendo con un peso máximo de 3 kg y dimensiones de aproximadamente 20 cm × 20 cm.

II-A1. Motorreductor (12 V, 80–100 RPM, torque 2.5–3 kg cm): Ya se ha mencionado la importancia de contar con un motor que ofrezca suficiente torque para empujar al oponente. El motorreductor seleccionado:

- Opera a 12 V y brinda entre 80–100 RPM bajo carga, generando un **torque nominal de 2.5–3 kg cm**.
- Satisface la demanda de *alto empuje* y un control de velocidad adecuado para maniobras en el dohyo.
- Su **reductora interna** permite al robot sostener esfuerzos prolongados sin un consumo excesivo de corriente.

II-A2. Driver de Motor: BTS7960: Este módulo se encarga de manejar las corrientes requeridas por el motor en arranques y choques. El BTS7960:

- Soporta **corrientes pico de hasta 43 A**, lo cual es esencial para embestidas y arranques bruscos.
- Opera en configuración de puente H, facilitando el control de dirección y la modulación de velocidad mediante PWM.
- Incorpora protecciones contra sobrecorriente y sobrecalentamiento, incrementando la seguridad del sistema.

II-A3. Comparativa de Rodamiento: Orugas vs. Ruedas: Para transmitir la potencia al piso, se contemplaron dos enfoques principales:

II-A3a. Orugas de Caucho:

- Distribuyen el peso sobre un área de contacto mayor, ofreciendo tracción elevada en superficies lisas.
- Podrían brindar mayor estabilidad al robot, reduciendo la posibilidad de derrapes.
- Sin embargo, una fricción excesiva puede dificultar los giros, haciendo que el robot sea menos maniobrable.

II-A3b. Ruedas de Alta Fricción:

- Su menor área de contacto permite giros más rápidos y con mayor precisión.
- Seleccionar un material blando (poliuretano o caucho) incrementa la adherencia, evitando patinajes excesivos.
- Con un diámetro de 60–70 mm, se logra un buen equilibrio entre fuerza de empuje y velocidad lineal.

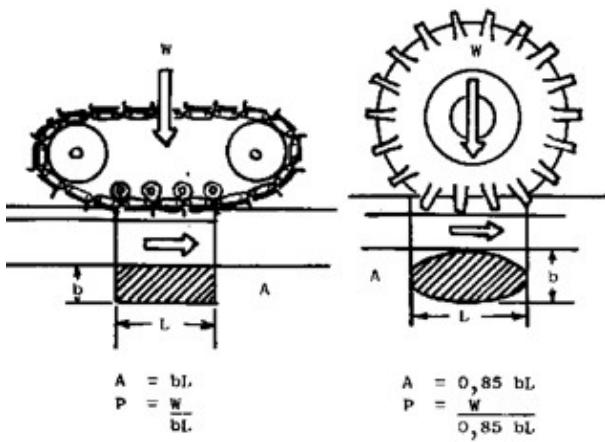


Figura 2. Comparativa entre orugas de caucho y ruedas de alta fricción.

Tras analizar ambas alternativas, se decidió **utilizar ruedas de alta fricción**, pues facilitan la maniobrabilidad y simplifican la implementación mecánica, manteniendo un empuje adecuado.

II-A4. Sensores de Línea: *QTR-8A*: Para detectar la línea blanca del dohyo y evitar salir de él, se utilizan **sensores IR reflectivos**:

- El arreglo QTR-8A combina 8 emisores y receptores IR que cubren un rango frontal amplio.
- Permite calibrar umbrales de detección (2–3 cm antes del borde), asegurando reacciones oportunas.

II-A5. Sensores de Distancia: *VL53LOX*: Para identificar al oponente y descartar objetos fuera de un rango predefinido:

- Ofrece lecturas Time-of-Flight (ToF) hasta **60 cm**, ignorando detecciones falsas por encima de ese umbral.
- Ayuda a iniciar la embestida cuando el rival se encuentra a una distancia corta, optimizando la estrategia de ataque.

II-A6. Batería LiPo 3S (11.1 V, 1500–2000 mAh): La alimentación del sistema se confía a una batería de litio-polímero:

- Proporciona un voltaje nominal de 11.1 V (12.6 V al 100 % de carga).
- Ofrece una alta densidad de energía en un formato ligero, contribuyendo a no superar los 3 kg de límite.

II-A7. Step-down (11.1 V → 5 V): Se incluye un convertidor *buck* para alimentar el PIC18F4550 y otros periféricos de 5 V:

- Garantiza un suministro estable y eficiente para la lógica de control.
- Permite manejar la diferencia de voltaje (11.1 V nominal a 5 V) sin desperdiciar excesiva potencia en calor.

II-A8. Level Shifter (5 V ↔ 3.3 V): Para la **FPGA Basys2** y posibles sensores de 3.3 V, se requiere un adaptador de niveles lógicos:

- Asegura la compatibilidad entre señales a 5 V (PIC) y 3.3 V (FPGA, sensores).
- Evita daños por sobrevoltaje y garantiza una comunicación confiable.

II-A9. Chasis de Aluminio: Se elige lámina de 2 mm de espesor para la base:

- Combina ligereza y resistencia a impactos.
- Facilita el montaje de motores, driver y sensores, manteniendo la forma trapezoidal recomendada para un mejor ángulo de ataque.

II-A10. Tornillería, Cables y Cargador: Estos elementos, aunque consumibles, son indispensables:

- **Tornillería y cables**: Permiten la sujeción de componentes y la interconexión eléctrica, respectivamente.
- **Cargador LiPo balanceador**: Mantiene la batería en óptimas condiciones de carga y seguridad.

II-B. Selección del Microcontrolador y la Familia PIC18

Por qué PIC18F4550:

- **Arquitectura de 8 bits optimizada**: Suficiente para la lógica de control, lectura de sensores y generación de PWM.
- **Periféricos integrados**: Contiene módulos CCP/ECCP, USART, SPI e I2C, simplificando la comunicación con sensores y la FPGA.
- **Capacidad de USB (opcional)**: Aunque en este proyecto no se explote al máximo, brinda la posibilidad de futuros diagnósticos o actualizaciones.
- **Amplio soporte y documentación**: La familia PIC18 es ampliamente conocida en la comunidad de robótica, con ejemplos y librerías disponibles.

Esta familia de microcontroladores ofrece una **buena relación costo-beneficio**, un entorno de desarrollo estable (MPLAB, XC8) y flexibilidad para implementar el control PID, lectura de línea y distancia, y la gestión de PWM.



Figura 3. Ilustración de algunos componentes seleccionados, mostrando motores, driver y sensores utilizados en el robot sumo.

II-C. Presupuesto Inicial

La Tabla II presenta el desglose de costos aproximados para la etapa inicial, basados en referencias de mercado (Mercado Libre, AliExpress, etc.). No se incluyen costos indirectos (laboratorio, CNC, etc.) ni patrocinios potenciales.

Cuadro I
PRESUPUESTO INICIAL DEL PROYECTO

Componente	Cantidad	Precio (MXN)
PIC18F4550	1	\$120
Driver BTS7960	1	\$200
Motorreductor 12 V (80–100 RPM)	2	\$400 (total)
QTR-8A (Sensores de línea)	1	\$300
VL53L0X (Sensor de distancia)	2	\$400 (total)
Batería LiPo 3S	1	\$500
Step-down (11.1 → 5 V)	1	\$80
Level Shifter (5 V–3.3 V)	1	\$60
Ruedas alta fricción (par)	1	\$250
Chasis Aluminio (2 mm)	1	\$200
Tornillería, cables	1 set	\$200
Cargador LiPo	1	\$400
Total		\$4,660

II-D. Conclusiones de la Planeación

La planeación se enfoca en garantizar la **fuerza de empuje** necesaria para el robot sumo de 3 kg, seleccionando un motorreductor robusto y un driver capaz de manejar picos de corriente elevados. El uso de ruedas de alta fricción optimiza la tracción, mientras que los sensores (QTR-8A y VL53L0X) y el microcontrolador PIC

III. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS FINANCIERO / PRESUPUESTAL

En este capítulo se retoma el **presupuesto inicial** del proyecto (presentado en el Capítulo 2) y se compara con los **gastos reales** documentados recientemente. Adicionalmente, se clasifican los elementos en **gastos, inversiones y costos**, con base en definiciones breves de estos conceptos, para luego relacionarlos directamente con el proyecto del robot sumo de 3 kg.

III-A. Breve Introducción a Pagos, Gastos e Inversión

- **Pago:** Desembolso puntual de efectivo para adquirir un bien o servicio. Por ejemplo, la compra de un driver de motor es un pago único.
- **Gasto:** Consumo de recursos durante la operatividad inmediata, sin valor residual a futuro (e.g., baterías, materiales de ensamblaje).
- **Inversión:** Desembolso que aporta valor más allá de la etapa actual, permitiendo escalabilidad o mejoras en el proyecto (e.g., microcontrolador, FPGA, motores).

Estas categorías ayudan a planificar mejor los recursos, pues diferencian lo que es puramente operativo de lo que contribuye al desarrollo a largo plazo.

III-B. Presupuesto Inicial Recapitulado

En el Capítulo 2 se estimó un presupuesto de aproximadamente \$4,660 MXN, distribuidos de la siguiente manera:

Cuadro II
PRESUPUESTO INICIAL (RESUMEN)

Concepto General	Monto Estimado (MXN)
Microcontrolador, driver, motorreductores, sensores (línea y distancia), step-down, shifter, batería, ruedas, chasis, cables, cargador	4,660

Este cálculo consideraba referencias de tiendas en línea (Mercado Libre, AliExpress) y tiendas locales, sin incluir costos indirectos (uso de taller, equipo de laboratorio) ni patrocinios.

III-C. Gastos Reales Documentados

La **tabla de compras reales** se muestra en la Tabla III, la cual se extrajo de registros contables del proyecto. Cada ítem indica su precio unitario y total, así como la cuenta contable (*Inventarios, Banco, etc.*) y una breve descripción.

Cuadro III
COMPRAS REALES DEL PROYECTO (EXTRACTO)

Material	Cant.	Total (MXN)	Comentarios
Adaptador USB-Serial TTL	1	69.99	Comunicación con MCU
Buck DC-DC (12 V a 5 V)	1	301.35	Regulador principal
Conv. Lógico (5–3.3 V)	1	103.55	Para FPGA
Kit de cables	1	139.89	Conexiones internas
Kit de tornillos	1	150.00	Ensamble mecánico
PIC18F4550	1	299.68	MCU principal
Sensores línea	1	139.20	Detección dohyo
QTR-8A			
Tarjeta desarr. PIC18F4550	1	86.99	Pruebas microcontrolador
BTS7960 (2 und.)	2	238.80	Driver motor
Motorreductor 12 V (2 und.)	2	273.22	Tracción principal
Placas MDF (2 und.)	2	80.00	Soportes/prototipo
Sensor láser VL53L0X (2 und.)	2	163.78	Detección rivales
Total Inventarios		2046.45	

Cabe señalar que estos valores y cálculos se encuentran anexados en la carpeta de OneDrive donde se ubica el archivo de este anteproyecto.

En esta compra real, se observa un subtotal de 2046.45 MXN correspondiente a los materiales inventariados, algunos de los cuales difieren en costo unitario con respecto al presupuesto inicial. A ello se suman gastos operativos, envíos y otros consumibles que no aparecen en esta tabla parcial.

III-D. Comparación con el Presupuesto Estimado

Aunque la compra real (2046.45 MXN) se sitúa por debajo del monto total inicial de 4660 MXN, se deben considerar otros costos que aún no se reflejan, como la **batería LiPo**, las **ruedas de alta fricción**, la **lámina de aluminio** y el

cargador LiPo. Varios de estos ítems se etiquetan como gastos o inversiones según su utilidad a largo plazo:

- **Inversión:** Microcontrolador, driver BTS7960, motorreductores, sensores de distancia, tarjeta de desarrollo, convertidores lógicos (pues permiten mejoras futuras).
- **Gastos:** Batería LiPo, sensores de línea (desgaste operativo), cables, MDF (usado en prototipado).

Se prevé que, al añadir la compra de la batería, las ruedas y el chasis de aluminio, el gasto total se aproxime o supere la cifra de 4660 MXN inicial.

III-E. Clasificación de los Elementos en el Proyecto

Basados en los criterios de *Gastos* e *Inversión* descritos al inicio, la mayoría de los componentes electrónicos que no se desgastan o no requieren reemplazo periódico se consideran **Inversión**, mientras que los materiales consumibles se clasifican como **Gastos**. Algunos ejemplos:

- **Inversión:**
 - **PIC18F4550:** Componente clave de control, reutilizable en mejoras futuras.
 - **BTS7960:** Driver de motor con vida útil prolongada.
 - **Motores DC:** Reaprovechables en otras fases o versiones del robot.
 - **Tarjeta de Desarrollo:** Permite prototipar múltiples proyectos con el mismo MCU.
- **Gasto:**
 - **Sensores de línea (QTR-8A):** Se degradan con el uso y podrían requerir sustitución.
 - **Placas de MDF y Tornillería:** Empleados en la fabricación, sin valor residual significativo.
 - **Batería LiPo:** Se agota con los ciclos de carga y requiere reemplazo periódico.

III-F. Balance General y Cuentas Contables

Para el periodo del 04 de febrero al 27 de marzo de 2025, se presenta un Balance General que resume la situación financiera del proyecto:

ROBOT SUMO		
Balance General		
Del 04 de Febrero al 27 de Marzo del 2025		
ACTIVO	PASIVO	
ACTIVO CIRCULANTE	PASIVO CIRCULANTE	
Banco	73.67	Cuentas por pagar
Inventarios	2046.45	TOTAL PASIVO
		369.89
CAPITAL		
	Capital social	1750.23
	TOTAL CAPITAL	1750.23
TOTAL ACTIVO	2120.12	TOTAL PASIVO + CAPITAL
		2120.12

Figura 4. Balance General del Proyecto Robot Sumo, mostrando Activos, Pasivos y Capital.

En este Balance General:

- **Activo Circulante:** Se compone de:

- *Banco:* \$73.67, que representa la liquidez disponible para gastos menores.
- *Inventarios:* \$2046.45, donde se incluyen los materiales y componentes adquiridos (por ejemplo, PIC18F4550, BTS7960, sensores, etc.).

- **Pasivo Circulante:** Corresponde a *Cuentas por pagar* por \$369.89, reflejando deudas a proveedores aún pendientes.
- **Capital:** Compuesto por un *Capital social* de \$1750.23, aportado por los integrantes o patrocinadores iniciales.

La suma total del Activo (2120.12) coincide con la del Pasivo más el Capital (2120.12), cumpliendo la ecuación contable básica:

$$\text{Activo} = \text{Pasivo} + \text{Capital}$$

Este estado financiero confirma que el proyecto mantiene un equilibrio en su contabilidad. A medida que se adquieran más componentes (ruedas, chasis de aluminio, etc.), se incrementará el valor de *Inventarios* o bien se reflejará un incremento en el *Pasivo* (si se compra a crédito) o una reducción del *Banco* (si se compra al contado).

III-G. Conclusiones del Análisis Financiero

La comparación del presupuesto inicial (\$4660 MXN) con los gastos reales (\$2046.45 MXN, sin contar elementos pendientes) revela que el **proyecto se mantiene dentro de un rango razonable de inversión y gastos**, aunque se espera que el monto final se acerque más a la cifra original al incorporar ítems faltantes (batería, ruedas, chasis de aluminio, etc.).

La clasificación en gastos e inversiones contribuye a la planificación a largo plazo:

- **Inversiones** como el microcontrolador, drivers y motores sostienen el valor del proyecto y facilitan expansiones futuras.
- **Gastos** como baterías y consumibles se asumen como parte de la operatividad inmediata y no generan valor residual.

Con esta perspectiva financiera, se pueden gestionar de manera más eficiente los recursos, ya sea buscando patrocinios para cubrir componentes estratégicos (inversiones) o destinando un presupuesto específico para gastos de uso continuo y reemplazo, asegurando la viabilidad económica del robot sumo de 3 kg.

IV. CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL ROBOT (MECÁNICO Y ELECTRÓNICO)

En este capítulo se describe el **diseño mecánico** y el **diseño electrónico** del robot sumo de 3 kg, tomando en cuenta la disposición de los componentes, la estructura del chasis y el *esquema electrónico preliminar*. Se hace énfasis en que el **esquema final** se encuentra en proceso de creación, debido a la investigación en curso sobre el funcionamiento interno de algunos de los módulos.

IV-A. Diseño Mecánico

El robot se ha concebido con una **base rectangular de 20 cm × 20 cm**, siguiendo las dimensiones máximas permitidas por la competencia. En la parte frontal, se integra una “**cuchara ofensiva**” (o cuña) para facilitar la embestida y empujar al oponente fuera del dohyo.

IV-A1. Distribución Interna de Componentes: En la Figura 5, se aprecia la disposición preliminar:

- **Motores (2 und.)** en la parte media-baja, con ejes alineados para la tracción.
- **Ruedas de alta fricción**, de aproximadamente 70 mm de diámetro, a cada costado.
- **Placas de Desarrollo (PIC18F4550 y FPGA Basys2)** ubicadas en la sección central, para un cableado ordenado y fácil acceso.
- **Cuchara ofensiva** (en el dibujo, “Base” frontal) con una extensión de unos 3–5 cm, para maximizar la zona de contacto al empujar.

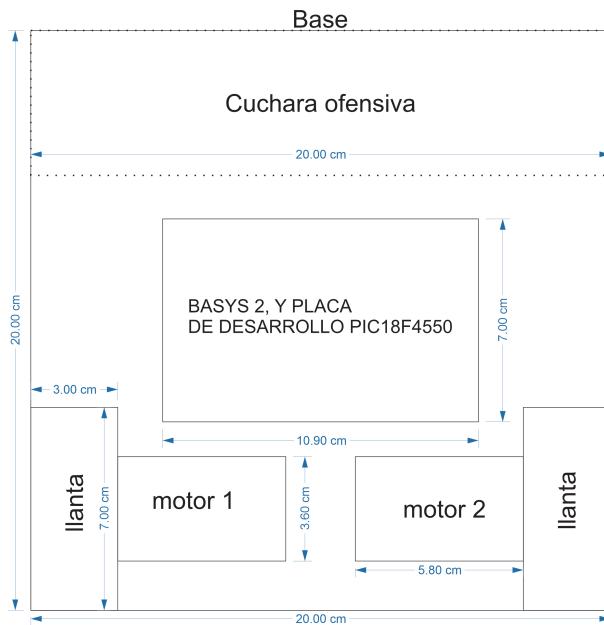


Figura 5. Diseño base (vista superior), mostrando la ubicación de motores, ruedas y placas de control.

IV-A2. Prototipo del Chasis (Versión v1): Como avance significativo, ya se ha desarrollado una **versión v1 del chasis**. En esta iteración se ajustaron las proporciones y la posición de los componentes dentro del área permitida, optimizando la distribución de masa y el espacio para la integración de la electrónica. Este prototipo permitió validar la viabilidad del diseño mecánico y realizar ajustes en la ubicación de la cuchara ofensiva, motores y soporte para la batería.



Figura 6. Prototipo del chasis Versión v1, mostrando el ajuste de proporciones y posiciones de los componentes en el área de 20 cm × 20 cm.

IV-A3. Justificación del Chasis:

- **Material (Aluminio de 2 mm):** Combina ligereza y resistencia, soportando impactos en embestidas y protegiendo los componentes internos.
- **Forma Trapezoidal o Rectangular:** Se ajusta a las normas de 20 cm de lado y permite la incorporación de la cuña frontal.
- **Distribución de Componentes:** La versión v1 del chasis demostró que la ubicación centralizada para la batería LiPo (11.1 V nominal) y las placas de control favorece un equilibrio óptimo, reduciendo el riesgo de desestabilización.

IV-B. Diseño Electrónico

El robot integra cuatro bloques funcionales (ver Figura 7):

1. **Bloque de Alimentación**
2. **Bloque de Control y Procesamiento**
3. **Bloque de Control de Movimiento**
4. **Bloque de Sensado**

IV-B1. Bloque de Alimentación:

- **Batería LiPo 3S (11.1 V nominal):** Provee la potencia requerida por los motores y la electrónica.
- **Convertidor buck (12 V → 5 V):** Alimenta el PIC18F4550 y otros periféricos de 5 V.
- **Level Shifter (5 V ↔ 3.3 V):** Ajusta niveles para la FPGA Basys2 y/o sensores a 3.3 V.

IV-B2. Bloque de Control y Procesamiento:

- **PIC18F4550:** Microcontrolador principal, encargado de la lectura de sensores (línea y distancia), ejecución de algoritmos de control (PID, etc.) y la comunicación SPI con la FPGA.
- **FPGA Basys2:** Maneja la generación de PWM de alta precisión, descargando al PIC tareas de modulación, y procesando señales adicionales en paralelo.

IV-B3. Bloque de Control de Movimiento:

- **Driver de Motor (BTS7960):** Soporta corrientes pico de hasta 43 A, asegurando un empuje potente y controlado. Recibe la señal PWM de la FPGA.

- **Motores (12 V, 80–100 RPM):** Ubicados lateralmente para tracción diferencial, permitiendo giros precisos y embestidas eficientes.

IV-B4. Bloque de Sensado:

- **Sensores de Línea (QTR-8A):** Ocho emisores y receptores IR para detectar la franja blanca del dohyo y evitar salidas accidentales.
- **Sensores de Distancia (VL53L0X):** Proporcionan lecturas de Time-of-Flight hasta 60 cm, filtrando objetos fuera del área de combate.

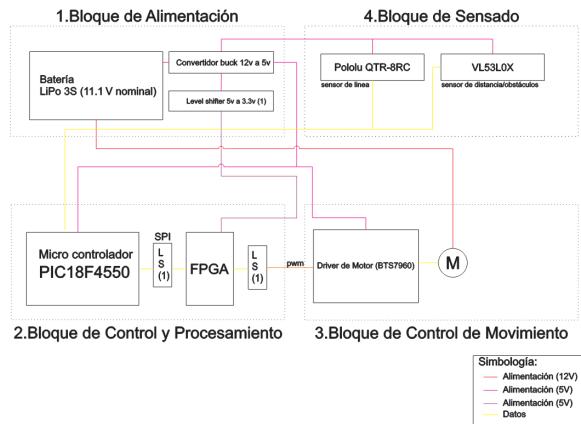


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema electrónico, resaltando la alimentación, el control y el sensado.

IV-B5. Esquema Electrónico (en proceso): Actualmente se investiga el funcionamiento interno de algunos módulos y se está configurando la asignación de pines del PIC18F4550 para la comunicación SPI e I2C. Por ello, el **esquema electrónico definitivo** se encuentra en proceso de elaboración, adaptándose a los requerimientos de los fabricantes y a la lógica de control final.

IV-B5a. Justificación de la Elección de Componentes:

- **PIC18F4550:** Seleccionado por sus periféricos integrados (SPI, I2C, USB opcional) y su capacidad de procesamiento a 8 bits, adecuado para la ejecución de algoritmos de control.
- **FPGA Basys2:** Permite la generación de señales PWM de alta frecuencia y precisión, liberando al PIC de tareas de modulación.
- **BTS7960:** Ofrece robustez y capacidad para manejar altos picos de corriente, fundamentales en situaciones de combate.

IV-C. Conclusiones del Diseño Mecánico y Electrónico

El diseño mecánico se fundamenta en una estructura robusta de aluminio con una base de 20 cm × 20 cm, que en su versión v1 ya ha sido prototipada y ajustada para optimizar la distribución de masa y el espacio disponible. La arquitectura electrónica, dividida en bloques de alimentación, control, movimiento y sensado, asegura la integración y el funcionamiento coordinado de todos los subsistemas. Aunque el esquema

electrónico final aún está en proceso, la distribución lógica de módulos y la selección de componentes garantizan que el robot cumpla con los requisitos de alto empuje y estabilidad en la competencia de sumo.

V. CAPÍTULO 5: LÓGICA DE CONTROL Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

En este capítulo se profundiza en la **lógica de control** y en los **protocolos de comunicación** implementados en el robot sumo de 3 kg. Se retoma lo discutido en capítulos anteriores sobre la coordinación entre el microcontrolador PIC18F4550, la FPGA Basys2, el driver de motor BTS7960 y los sensores, resaltando la relevancia de la comunicación SPI y los avances realizados en la *Basys2*.

V-A. Lógica de Control en el Microcontrolador PIC18F4550

El **PIC18F4550** gestiona la mayor parte de la lógica de control:

■ Lectura de Sensores:

- Sensores de línea (QTR-8A) conectados a puertos analógicos/digitales, determinan cuándo el robot se acerca a la franja blanca.
- Sensores de distancia (VL53L0X o similares) para detectar la presencia del oponente a menos de 60 cm.

■ Ejecución de Algoritmos PID:

Permite ajustar la velocidad y dirección de los motores para corregir la trayectoria o embestir con mayor precisión.

■ Comunicación SPI con la FPGA:

Envía consignas de PWM, velocidad y otras señales de control para la modulación de potencia en el driver BTS7960.

Este enfoque libera al PIC de la generación de PWM de alta resolución, delegándola a la *Basys2*, mientras conserva recursos para procesar datos de sensores y tomar decisiones en tiempo real.

V-B. Protocolos de Comunicación

V-B1. SPI (Serial Peripheral Interface): La comunicación SPI se emplea entre el **PIC18F4550** (maestro) y la **FPGA Basys2** (esclavo). De esta manera:

- El PIC envía valores de **Duty Cycle** y otras banderas de control para generar la señal PWM.
- La FPGA recibe estos datos y ajusta internamente los registros que modulan el ciclo de trabajo de la salida PWM.

Este protocolo se escogió por su sencillez y **baja latencia**, ideal para sistemas de control que requieren reacciones rápidas.

V-B2. I2C: Se contempla la posibilidad de usar I2C para **sensores de distancia** (ej. VL53L0X), aunque en algunas configuraciones puede emplearse un bus similar o la capa de comunicación de la propia FPGA.

V-B3. UART (Opcional): El PIC18F4550 también ofrece un módulo EUSART que podría utilizarse para depuración o telemetría, en caso de implementarse una futura comunicación inalámbrica.

V-C. Avances en la FPGA Basys2

V-C1. Generación de PWM y Pruebas SPI: La **FPGA Basys2** se ha utilizado para comenzar las pruebas de la *lógica SPI* y la *generación de señales PWM*. Aunque el código VHDL definitivo está en desarrollo, se han implementado módulos básicos que permiten:

- **Registrar datos** (4 bits o más) provenientes del bus SPI, almacenándolos en un registro interno.
- **Cargar o desplazar dichos registros** según señales de habilitación y limpieza (CE, CLR, etc.).
- **Producir salidas PWM** ajustadas al valor recibido desde el PIC, garantizando una modulación estable a la frecuencia deseada.

V-C1a. Descripción de la Lógica: Los módulos en VHDL se dividen en entidades como `reg_ps`, `registro_p` y `registro_sp`. Cada uno:

- Declara puertos de entrada (p.ej., CLK, CE, SHIFT_LOAD) y salida (SLO, Q), así como señales internas para el almacenamiento de datos.
- Implementa un proceso sensible al flanko ascendente de CLK (y a la señal de CLR), reseñando los registros cuando CLR está activo.
- En modo *Load*, transfiere datos **directamente** a los registros; en modo *Shift*, desplaza los bits hacia la izquierda o la derecha, extrayendo el bit más significativo.

Esta estructura de *shift registers* y *parallel registers* forma la base de la interfaz SPI en la FPGA, permitiendo al **PIC18F4550** enviar valores de PWM u otras banderas de control. Posteriormente, la *Basys2* interpreta esos datos y ajusta la señal PWM que se entrega al driver de motor **BTS7960**.

V-C1b. Estrategia de Integración:

- Se conecta el bus SPI (MOSI, MISO, SCK, SS) del PIC a los pines correspondientes en la **Basys2**.
- Los registros `reg_ps` y `registro_p` reciben los bits seriales, transformándolos en un valor paralelo que alimenta el módulo PWM.
- Un **contador interno** en la FPGA determina la frecuencia de la señal PWM, mientras el valor paralelo define el **Duty Cycle**.

V-D. Estrategias de Control para Competencia

Para **ganar el combate** en el dohyo, el robot no solo debe embestir al oponente, sino también evitar ser empujado y evitar salirse de la pista. Algunas estrategias contempladas son:

V-D1. Detección Oportuna del Rival:

- Usar los **sensores de distancia** (VL53L0X) para identificar la posición del contrincante y aproximarse con *velocidad media*.
- Al estar a menos de 30–40 cm, aumentar la **velocidad de embestida** para sorprender y desplazar al rival.

V-D2. Mantenimiento en el Dohyo:

- Configurar los **sensores de línea** (QTR-8A) para detectar la franja blanca con al menos 2–3 cm de anticipación.

- Al reconocer la línea, el algoritmo PID reduce la velocidad del motor en ese costado, girando el robot hacia el centro.
- Se emplean maniobras suaves para no perder tracción ni ser empujado por inercia fuera del dohyo.

V-D3. Maniobras de Reposición y Contraembestida:

- Si el robot detecta que está siendo empujado, puede usar la **lectura de sensores de línea** para frenar y girar, tratando de forzar un cambio de dirección del rival.
- Se puede implementar un **modo de contraembestida**: al detectar un choque frontal, aumentar el **Duty Cycle** en los motores para ejercer un empuje adicional y ganar la fricción necesaria.

V-D4. Control PID Dinámico:

- Se ajustan **ganancias P, I y D** según el estado del combate: más agresivo al detectar al oponente, más conservador al acercarse al borde.
- El PID ayuda a compensar deslizamientos y a mantener la trayectoria deseada cuando el robot gira o frena bruscamente.

V-E. Conclusiones de la Lógica de Control y Comunicación

El diseño de la **lógica de control** se basa en delegar la generación de PWM de alta precisión a la **FPGA Basys2**, mientras que el **PIC18F4550** se encarga de procesar la información de sensores y enviar consignas vía **SPI**. Esta separación de tareas:

- Permite **respuestas rápidas** y estables en la modulación de los motores (BTS7960).
- Optimiza el uso del microcontrolador para algoritmos de control (PID) y lectura de sensores.

Con respecto a la competencia, se plantean estrategias de *detección oportuna, mantenerse en el dohyo y contraembestidas* que, combinadas con un **control PID dinámico**, deberían maximizar las posibilidades de expulsar al oponente sin que el robot salga involuntariamente. La integración de la FPGA y el PIC en la comunicación SPI ya ha mostrado avances en la *Basys2*, sentando las bases para un sistema robusto de control en tiempo real.

VI. CAPÍTULO 6: POSIBLE IMPLEMENTACIÓN MODULAR DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Este capítulo explora la posibilidad de integrar un sistema de **telemetría inalámbrica** y/o detección de señales enemigas en el robot sumo de 3 kg, con la salvedad de que dicho sistema debe ser completamente **modular**. Esto significa que el módulo y la antena, fabricados por el equipo o mediante un sistema de detección propio, se utilizarán exclusivamente para pruebas y recolección de datos, y deberán poder ser retirados sin afectar el funcionamiento normal del robot durante el combate oficial, cumpliendo estrictamente con las reglas de la competencia.

VI-A. Objetivos del Sistema Inalámbrico Modular

El objetivo principal de este módulo es:

- Permitir el monitoreo en tiempo real de variables críticas (por ejemplo, velocidad, consumo, estado de sensores) durante la fase de pruebas.
- Recolectar datos que faciliten la optimización y ajuste de la estrategia de control, sin interferir en la operación autónoma durante la competencia.
- Facilitar la detección de señales enemigas en entornos de prueba, posibilitando el desarrollo de estrategias adicionales que en el futuro podrían incluir análisis del entorno.

VI-B. Tecnologías Inalámbricas Consideradas y Modalidad Modular

Se han evaluado diversas tecnologías para la implementación del módulo inalámbrico:

- **Wi-Fi:** Permite transmisiones de datos a alta velocidad. Se prevé el uso de módulos como el ESP8266 o ESP32.
- **Bluetooth:** Ofrece comunicación sencilla y de bajo consumo, adecuada para distancias cortas.
- **XBee (ZigBee):** Confiable y de bajo consumo, utilizado en aplicaciones de monitoreo.
- **LoRa:** Si bien su tasa de datos es baja, puede ser útil para pruebas a largas distancias.

Es importante destacar que el **sistema inalámbrico será modular y extraíble**. Durante las pruebas y la recolección de datos, el módulo se conectará al PIC18F4550, mediante interfaces como UART o SPI, para transmitir información de diagnóstico. Sin embargo, conforme se acerque la fase de competencia oficial, el módulo se desconectará o retirará para cumplir con la regla que prohíbe el uso de comunicación inalámbrica durante el combate.

VI-C. Implementación Preliminar y Estrategia de Integración

La estrategia de integración del módulo inalámbrico se basa en:

- **Fabricación Propia de la Antena:** El equipo desarrollará una antena específica que se ajuste al diseño modular del robot. Esta antena se instalará de forma que pueda ser conectada o desconectada fácilmente.
- **Interfaz Modular:** Se utilizará una interfaz estándar (por ejemplo, un conector tipo JST o similar) que permita la conexión/desconexión rápida del módulo inalámbrico sin requerir modificaciones en el circuito principal.
- **Pruebas en Entornos Controlados:** Durante la fase de pruebas, el módulo se activará para recolectar datos en tiempo real, como señales PWM, lecturas de sensores y estado de la batería, sin que ello afecte la lógica de control del robot.
- **Aislamiento durante el Combate:** Durante el enfrentamiento oficial, el módulo se mantendrá desconectado para garantizar que la comunicación RF no interfiera con el funcionamiento normal del robot, en cumplimiento de las reglas de la competencia.

VI-D. Estrategias de Telemetría y Recolección de Datos

El sistema inalámbrico modular permitirá implementar estrategias de telemetría que incluyen:

- **Monitorización en Tiempo Real:** Transmisión de datos críticos (velocidad, consumo, estado de sensores) a una interfaz de usuario en una computadora o dispositivo móvil.
- **Registro y Análisis de Datos:** Almacenamiento de la información recolectada para el análisis posterior, facilitando ajustes en la lógica de control, como la calibración de los parámetros del controlador PID.
- **Detección de Señales Ambientales:** Pruebas de un sistema de detección que, en futuras iteraciones, pueda identificar señales provenientes del entorno o incluso del robot rival, sin que este sistema permanezca activo durante el combate.

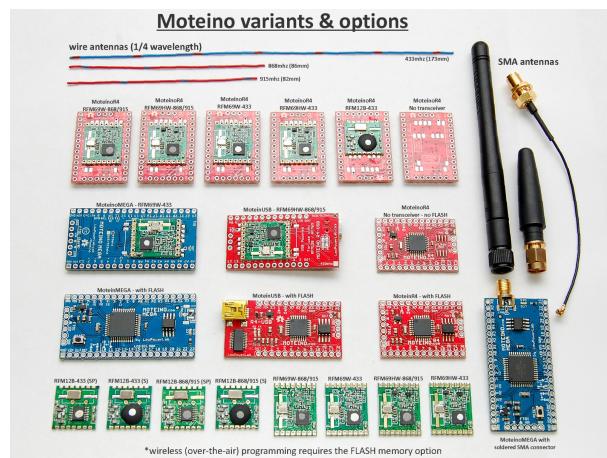


Figura 8. Diagrama preliminar del sistema modular de comunicación inalámbrica, mostrando el módulo extraíble y su conexión al PIC18F4550.



Figura 9. Ejemplo de interfaz de telemetría para la recolección de datos durante pruebas, sin interferir en el funcionamiento del robot.

VI-E. Conclusiones del Capítulo 6

La implementación modular de comunicación inalámbrica se plantea como una herramienta esencial para el desarrollo y la optimización del robot sumo, permitiendo:

- Realizar pruebas y recolectar datos críticos sin afectar el desempeño en combate.
- Facilitar la depuración y el ajuste de la lógica de control mediante la monitorización en tiempo real.
- Garantizar que, en la competencia oficial, el módulo pueda ser retirado sin interrumpir el funcionamiento autónomo del robot, cumpliendo con las reglas que prohíben el uso de comunicación RF durante el combate.

Esta estrategia modular asegura que el sistema de telemetría se utilice únicamente en fases de prueba y recolección de datos, proporcionando al equipo información valiosa para futuras mejoras, mientras que en el entorno de combate se mantiene el rendimiento óptimo del robot.

VII. CAPÍTULO 7: INTEGRACIÓN DEL BOOTLOADER Y AVANCES EN PROGRAMACIÓN

Como parte de los avances del proyecto, se ha integrado un sistema de **bootloader** en el PIC18F4550 utilizando el **MikroBootloader** (disponible en <https://www.mikroe.com/mikrobootloader>). Este bootloader ha sido modificado para funcionar con un reloj externo de 20 MHz, lo que mejora la precisión y estabilidad de la temporización en el firmware. La integración se realizó empleando un Pickit 2, facilitado por el profesor y asesor, Alejandro Regalado Escobedo.

VII-A. Objetivos y Ventajas del Bootloader

La incorporación del bootloader tiene múltiples beneficios para el desarrollo y mantenimiento del robot:

- **Actualización Rápida:** Permite reprogramar el microcontrolador a través de una conexión USB sin necesidad de utilizar herramientas de programación tradicionales.
- **Facilidad en la Depuración:** Facilita la carga y modificación del código, lo cual es esencial para ajustar los algoritmos de control y corregir errores durante las fases de prueba.
- **Seguridad y Robustez:** Incorpora mecanismos de verificación, como el uso de CRC para asegurar la integridad del firmware, y opciones para forzar la re-entrada al bootloader en caso de fallo.
- **Adaptabilidad:** Al poder actualizar el firmware in situ, se pueden implementar mejoras y nuevos modos de control sin reemplazar el hardware.

VII-B. Implementación y Estrategia de Integración

La integración se ha llevado a cabo de la siguiente manera:

- Se generó un archivo .hex modificado que incluye el bootloader adaptado para operar con un reloj externo de 20 MHz, lo cual aumenta la exactitud de los procesos temporales y la comunicación SPI con la FPGA.
- Utilizando un Pickit 2 proporcionado por el profesor Regalado Escobedo, se cargó inicialmente el bootloader en el PIC18F4550. Este proceso asegura que el microcontrolador pueda ser reprogramado mediante la conexión USB.

- Se desarrolló un **development board de fabricación propia** (véase Figura 10) que permite cargar el bootloader de forma rápida y sencilla. Este board también facilita la conexión USB para la transferencia de nuevos programas y ajustes en el código.

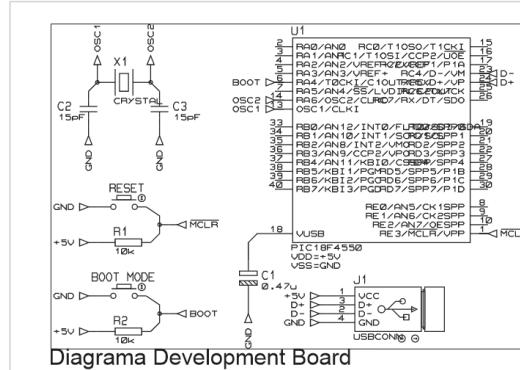


Figura 10. Development board de fabricación propia utilizada para cargar el bootloader.

Además, se ha elaborado un **diagrama de bloques** preliminar que ilustra la arquitectura del bootloader integrado, detallando cómo se reciben, almacenan y procesan los datos enviados desde el PIC para la generación de PWM y otras funciones críticas.



Figura 11. Diagrama de la arquitectura del bootloader en el PIC18F4550.

VII-C. Estrategias de Programación y Control Avanzado

La integración del bootloader abre nuevas oportunidades para mejorar el control y la adaptabilidad del robot:

- **Modularidad en el Firmware:** Se pueden cargar diferentes versiones de programas y ajustar parámetros del controlador PID para optimizar la respuesta en el dohyo.

- **Actualización en Campo:** La capacidad de reprogramar el microcontrolador mediante USB facilita la implementación de estrategias de combate avanzadas, permitiendo modificar algoritmos de detección y embestida según la experiencia en pruebas.
- **Mantenimiento y Depuración:** Al disponer de un bootloader robusto, se minimizan los tiempos de inactividad y se optimiza la gestión de errores en el firmware.

VII-D. Relevancia en el Contexto del Proyecto

El bootloader implementado es un componente esencial para el desarrollo de Caquineitor, ya que:

- Permite al equipo realizar iteraciones rápidas en el software, adaptándose a las necesidades del combate sin intervenir físicamente en el hardware.
- Asegura la integridad del sistema mediante mecanismos de verificación y recuperación en caso de fallos, incrementando la confiabilidad del robot.
- Contribuye a la escalabilidad del proyecto, ya que futuras mejoras podrán integrarse sin necesidad de rediseñar completamente el sistema de control.

En resumen, la integración del bootloader mediante Mikro-Bootloader y el uso de un development board propio representa un avance crucial en el desarrollo de Caquineitor. Esta solución mejora la capacidad de actualización, depuración y mantenimiento del firmware, garantizando que el sistema permanezca adaptable y robusto para enfrentar los desafíos de la competencia.

VIII. CAPÍTULO 8: IMPLEMENTACIONES FUTURAS

Este capítulo describe las mejoras y desarrollos pendientes que se plantean para futuras iteraciones del proyecto del robot sumo de 3 kg. Estas implementaciones buscan optimizar la capacidad de combate, facilitar la integración de componentes y ampliar las funcionalidades, basándose en los aprendizajes y resultados obtenidos en la versión actual.

VIII-A. Estrategias de Control y Ataque Automáticas

Aunque la versión actual implementa control PID básico y estrategias manuales de contraembestida, se plantea desarrollar algoritmos avanzados que permitan:

- **Estrategias de ataque automático:** Implementar modos de combate que, mediante análisis en tiempo real, determinen la mejor estrategia de embestida según la posición y el movimiento del oponente.
- **Control adaptativo:** Ajustar dinámicamente las ganancias del controlador PID para responder a variaciones en el entorno, como cambios en la iluminación o en el comportamiento del rival.
- **Modo de defensa inteligente:** Detectar y anticipar ataques enemigos, activando maniobras evasivas sin perder la estabilidad ni salirse del dohyo.

VIII-B. Diseño de una Versión 2 del Robot

La experiencia acumulada durante la fase actual permite identificar áreas de mejora para una segunda versión, que podría incluir:

- **Optimización del chasis:** Rediseñar la estructura para reducir peso y mejorar la distribución de masa, aumentando la estabilidad y maniobrabilidad.
- **Mejoras en la tracción:** Evaluar nuevas opciones de ruedas o sistemas de rodamiento que ofrezcan mayor adherencia sin sacrificar la capacidad de giro.
- **Avances en el control:** Incorporar estrategias automáticas de ataque y defensa, basadas en algoritmos de control adaptativo.

VIII-C. Creación de una PCB Personalizada para el Sistema Electrónico

Actualmente, el robot utiliza placas de desarrollo y módulos comerciales (como el PIC18F4550 y la FPGA Basys2) que, aunque funcionales, pueden presentar limitaciones en términos de integración y tamaño. Se plantea desarrollar una **PCB personalizada** que permita:

- Integrar todos los módulos electrónicos en un solo circuito, reduciendo el cableado y la dispersión de componentes.
- Optimizar la gestión térmica y eléctrica, mejorando la estabilidad y eficiencia del sistema.
- Disminuir el tamaño global de la electrónica, facilitando su montaje dentro del chasis y reduciendo el peso total.

VIII-D. Mejoras Mecánicas, Electrónicas y de Comunicación

A partir de la evaluación de la versión actual, se identifican varias áreas de mejora:

- **Mecánicas:** Refinar el diseño del chasis, mejorar los puntos de montaje y considerar materiales alternativos que ofrezcan mayor resistencia y menor peso.
- **Electrónicas:** Ampliar la capacidad de procesamiento y comunicación, optimizando la integración entre el PIC, la FPGA y otros módulos, y reduciendo la latencia en la transmisión de señales.
- **Comunicación:** Investigar e implementar soluciones para una comunicación interna más robusta y, a futuro, sistemas inalámbricos modulares que se puedan retirar fácilmente durante la competencia, manteniendo la recolección de datos y telemetría en fase de pruebas.

VIII-E. Conclusiones y Perspectivas Futuras

La versión actual del robot sumo ha establecido una base sólida para competir en torneos, pero la constante evolución tecnológica y la experiencia práctica obtenida abren la puerta a mejoras significativas. Las implementaciones futuras apuntan a:

- Desarrollar estrategias de control y ataque automáticas que permitan una mayor autonomía y adaptabilidad en el combate.

- Rediseñar el robot para crear una versión 2, más ligera, integrada y eficiente.
- Diseñar una PCB personalizada que consolide el sistema electrónico y optimice su rendimiento.
- Mejorar la comunicación interna y explorar opciones modulares de telemetría para pruebas sin interferir en la competencia.

Estas mejoras no solo buscan incrementar el rendimiento competitivo del robot, sino también facilitar su escalabilidad y adaptabilidad a futuras necesidades y retos, contribuyendo al crecimiento y la evolución continua del proyecto.

IX. CAPÍTULO 9: CONCLUSIÓN Y BIBLIOGRAFÍA

IX-A. Conclusión

El presente anteproyecto ha representado un esfuerzo integral y colaborativo del **Equipo de Carbones Calavera "La Resurrección"** para el desarrollo del robot sumo de 3 kg, denominado **Caquineitor**. A lo largo del informe se han documentado los aspectos fundamentales del proyecto, desde la planificación estratégica y la selección de componentes hasta la implementación de la lógica de control, la comunicación y las estrategias de combate.

Caquineitor ha sido diseñado para maximizar la potencia de empuje, asegurando al mismo tiempo la maniobrabilidad y la estabilidad dentro del dohyo. La arquitectura electrónica, basada en la comunicación SPI entre el PIC18F4550 y la FPGA Basys2, junto con el uso del driver BTS7960, constituye la base de un sistema robusto y eficiente. La incorporación del bootloader mediante MikroBootloader y la posibilidad de actualizar el firmware a través de USB son avances que potencian la versatilidad y la capacidad de adaptación del sistema.

Además, se han planteado módulos futuros que incluyen estrategias de control automáticas, una PCB personalizada y mejoras en la comunicación interna. Estos desarrollos no solo incrementan el rendimiento competitivo de Caquineitor, sino que también sientan las bases para futuras iteraciones y mejoras en el proyecto.

En resumen, el proyecto demuestra la viabilidad técnica y financiera de un robot sumo competitivo, y sienta las bases para un desarrollo continuo y escalable, alineado con las expectativas de la competencia y las necesidades de innovación en la ingeniería.

IX-B. Bibliografía

REFERENCIAS

- [1] Manual del Proyecto Integrador, Universidad de Colima, 2025.
- [2] Reglas Oficiales de la Competencia de Robot Sumo, UPIITA-IPN, 2025.
- [3] Microchip Technology Inc., *PIC18F4550 Datasheet*, DS39632E, 2009.
- [4] Microchip Technology Inc., *BTS7960 Datasheet*, consultado en 2025.
- [5] MikroBootloader. Disponible en: <https://www.mikroe.com/mikrobootloader>.
- [6] IEEE Standards Association, *Standards for Electronic System Design*, IEEE, 2020.
- [7] Normas de Diseño Mecánico y Electrónico, Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2021.
- [8] IEEE Xplore, *Advances in Sumo Robotics and Motor Control*, 2022.
- [9] Springer, *Robotics in Competitive Environments: Sumo Robots*, 2023.
- [10] ScienceDirect, *Control Strategies for DC Motors in Robotics*, 2021.
- [11] K. J. Åström y T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed., ISA, 1995.
- [12] M. A. Mazidi, R. D. McKinlay, et al., *PIC Microcontrollers: An Introduction to Microelectronics*, Pearson, 2007.
- [13] S. Brown y Z. Vranesic, *Fundamentals of Digital Logic with VHDL Design*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2009.
- [14] J. H. Lipson y H. Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*, John Wiley & Sons, 2013.
- [15] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 7th ed., Wiley, 2015.
- [16] Arduino.cc, <https://wwwarduino.cc/>.
- [17] Texas Instruments, <https://www.ti.com/>.
- [18] Pololu, <https://www.pololu.com/>.
- [19] RobotShop, <https://www.robotshop.com/>.
- [20] All About Circuits, <https://www.allaboutcircuits.com/>.
- [21] EEVBlog, <https://www.eevblog.com/>.
- [22] Tutorial de SPI, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-spi/>.
- [23] Explicación sobre PWM y H-bridges, <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pwm.html>.
- [24] YouTube, *Introducción a la robótica de sumo*, https://youtu.be/pjSIuoyelU?si=lEf31fDhsnmB_mF3.
- [25] YouTube, *Estrategias para robots sumo*, <https://www.youtube.com/watch?v=0WRKzKOBLOQ>.
- [26] YouTube, *Control de motores con FPGA y PIC*, <https://youtu.be/SJPBiI28lzo?si=kkQ555MGTWejIgeR>.
- [27] YouTube, *Implementación de PWM en robots*, <https://www.youtube.com/watch?v=pW1zSV84MWc>.
- [28] YouTube, *Diseño de robots sumo*, <https://www.youtube.com/watch?v=aXHuZG7kcJl>.

Nota: Los valores, cálculos y documentación complementaria (incluyendo hojas de datos, avances, y la contabilidad) están anexados en la carpeta de OneDrive donde se encuentra el archivo completo del anteproyecto.