

EQUILIBRIO MONOPODAL CON GIROSCOPIO EN UN MINIROBOT BÍPEDO HUMANOIDE

ONE FOOT EQUILIBRIUM WITH GYROSCOPIC MOTION IN A HUMANOID BIPEDAL MINIROBOT

Luis Jared Mercado León

Universidad Tecnológica de Querétaro, México
luis2020348081@gmail.com

Domingo Rangel Miranda

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM Campus Juriquilla, México
rangel@fata.unam.mx

Recepción: 12/febrero/2026

Aceptación: 13/mayo/2026

Resumen

Este trabajo presenta un sistema mecatrónico diseñado y construido para controlar automáticamente la posición de equilibrio monopodal en un minirobot bípedo humanoide. Se basa en un sensor inercial de 3 ejes *MPU6050* que retroalimenta la posición de equilibrio a un servomotor en un esquema de control PID, análogo al movimiento del tobillo de un pie. El minirobot se construyó con las proporciones escaladas de las extremidades de un humano promedio y con un tórax especial para acondicionar diferentes pesos extras en pruebas de equilibrio. Se hicieron pruebas agregando peso en el tórax y abdomen del minirobot hasta de un 30%, que representa 70% del torque nominal del servomotor, logrando mantener el equilibrio. Los tiempos de llegada al punto de equilibrio fueron de 1650 ms en promedio y con sobrepasos en el plano vertical máximos del 5%. Esta propuesta puede ser aplicada en estudios de rehabilitación y fisioterapia.

Palabras Clave: Bípedo, equilibrio, giroscopio, humanoide, robot.

Abstract

This paper presents a mechatronic system designed and built to automatically control the single-leg balance position of a humanoid bipedal mini-robot. It is based on a 3-axis MPU6050 inertial sensor that provides feedback on the balance position

to a servomotor in a PID control scheme, analogous to ankle movement. The mini-robot was built with scaled proportions of an average human limb and a special thorax to accommodate different additional weights during balance tests. Tests were conducted adding up to 30% of the weight on the mini-robot's thorax and abdomen, representing 70% of the servomotor's nominal torque, successfully maintaining equilibrium. The average time to reach the balance point was 1650 ms, with maximum overshoots in the vertical plane of 5%. This system can be applied in rehabilitation and physiotherapy studies.

Keywords: *Balance, biped, gyroscope, humanoid, robot.*

1. Introducción

En la actualidad, la investigación en robótica bípeda se ha centrado mayormente en el desarrollo de sistemas de locomoción orientados al movimiento de marcha, dejando de lado el estudio y control de movimientos más complejos y adaptativos, como la transición de una postura flexionada a una erguida o el mantenimiento del equilibrio dinámico en los tobillos. Estos movimientos requieren una alta precisión en la coordinación de las articulaciones de las extremidades inferiores, emulando el comportamiento humano [Huang, 2023]. A nivel teórico, diversos estudios han presentado encuestas y revisiones sobre los enfoques de planificación de movimiento en robots humanoides, destacando los retos que persisten en la coordinación y estabilidad de sus trayectorias [Lima, 2024]. De manera complementaria, se han desarrollado modelos híbridos de locomoción con ruedas y piernas que amplían las capacidades de desplazamiento y equilibrio en robots humanoides [Liu, 2024]. En los últimos años, diversas investigaciones han revisado los modelos y estrategias de control aplicados en la robótica bípeda, destacando la necesidad de enfoques más adaptativos y robustos para mejorar la estabilidad y el realismo de los movimientos humanoides [Bong, 2022]. La ausencia de estudios enfocados en estas acciones específicas limita la aplicabilidad de los robots bípedos en entornos donde se demandan tareas variadas y adaptativas, como la asistencia a personas con movilidad reducida o la ejecución de movimientos precisos en entornos industriales. Durante el diagnóstico de necesidades se identificó que los

sistemas actuales carecen de la estabilidad necesaria para adaptarse a cambios de carga o condiciones dinámicas, lo que obliga a la intervención manual en más del 90% de las secuencias de movimiento. Esta situación evidencia la falta de sistemas de control robustos que puedan mantener la estabilidad en tiempo real y reducir la dependencia de configuraciones manuales [Guaypatin, 2019]. El presente proyecto busca automatizar movimientos humanoides específicos mediante un sistema de control avanzado basado en un controlador PID adaptativo, ajustado con métodos como Ziegler-Nichols [Tafur, 2024], e implementado sobre un microcontrolador con sensores de retroalimentación como el MPU-6050. La arquitectura propuesta integra actuadores tipo servomotor, sensores de corriente INA219 y un protocolo de comunicación eficiente para garantizar la precisión en el control. En este sentido, resulta fundamental considerar que el esfuerzo de los controladores tiene un impacto directo en la durabilidad de los actuadores, el consumo energético y la seguridad funcional de los sistemas, lo cual ha sido demostrado en estudios aplicados a elementos de control electroneumáticos [Bartyś, 2019]. La implementación de controladores PID en sistemas robóticos ha demostrado mejorar la precisión de los movimientos entre un 15% y un 25% en comparación con métodos más simples, además de optimizar el consumo energético y la respuesta dinámica [López, 2024]. Asimismo, el uso de interpolación discreta y estrategias de control secuencial permitirá suavizar transiciones críticas y reducir oscilaciones. Con este enfoque, el proyecto no solo busca optimizar la estabilidad y precisión de un robot bípedo durante movimientos complejos, sino también generar un modelo de referencia para futuras investigaciones en el campo de la robótica humanoide, ampliando el alcance de su aplicación en rehabilitación, asistencia personal y automatización industrial.

2. Métodos

Diseño funcional y partes del robot bípedo

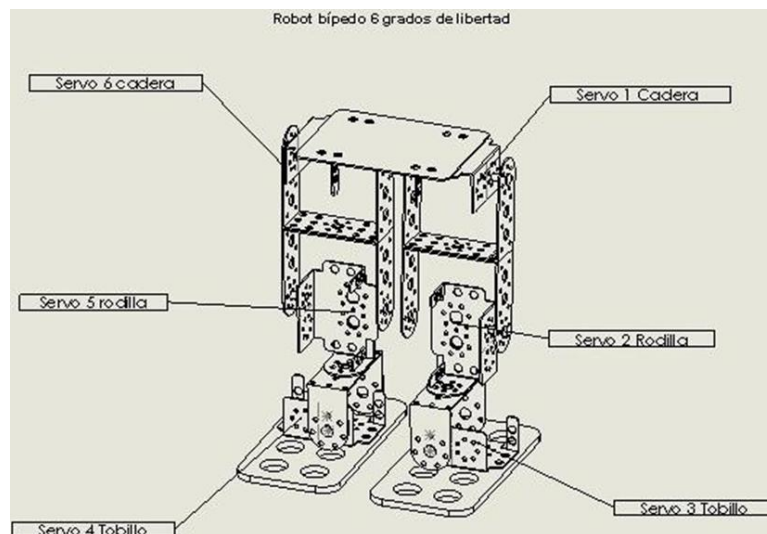
El desarrollo de sistemas humanoides con sensores inerciales y control basado en servomotores es una tendencia en la robótica educativa y experimental [Guaypatin, 2019], el cual guía al robot desde una postura inicial, ya sea sentado o

en reposo, hacia una posición de equilibrio monopodal. El sistema robótico se programó para que inicie sus movimientos mediante un control secuencial. Este procedimiento se desarrolla en dos fases principales: transición postural y control de equilibrio dinámico. La primera fase comienza con la activación del control secuencial, donde el robot parte de una posición sentada o de reposo. Se emplean cuatro grados de libertad, controlados por servomotores ubicados en las articulaciones de las rodillas y cadera, para coordinar el movimiento de incorporación. La ejecución de movimientos se realiza mediante secuencias temporizadas, asegurando una transición suavizada hacia la posición bípeda. En la segunda fase, que es el equilibrio dinámico, se activa el controlador PID en la articulación del tobillo correspondiente a la pierna de apoyo. El robot transfiere progresivamente su peso hacia una sola extremidad, permitiendo que la pierna contraria se retraiga. En este estado, el tobillo en apoyo funciona como un péndulo invertido, manteniendo la estabilidad en tiempo real frente a perturbaciones externas, buscando siempre el centro de gravedad del peso distribuido del robot. Este mismo esquema de control se aplica colocando al robot en superficies inclinadas, garantizando que el robot mantenga una postura vertical sin importar la inclinación del terreno.

Características estructurales de las extremidades inferiores del robot bípedo

En la Figura 1 se muestra el segmento inferior del robot bípedo, construido a partir de una aleación de aluminio, debido a su relación óptima entre resistencia mecánica y peso reducido. Este material, además de otorgar rigidez estructural, presenta buena resistencia a la fatiga y a la deformación bajo cargas dinámicas, características necesarias para replicar de forma precisa la locomoción humanoide. Esta sección dispone de 6 *grados* de libertad (DOF), distribuidos de la siguiente manera: 2 DOF en la cadera, para el movimiento de flexión/extensión y abducción/aducción, 2 DOF en la rodilla para la flexión/extensión en cada pierna y 2 DOF en el tobillo para el movimiento de flexión dorsal/plantar y ajustes de inclinación. Estas articulaciones permiten una amplia gama de movimientos humanoides y la adopción de posturas, simulando además la cinemática de la

marcha humana. Las dimensiones de las extremidades inferiores, incluyendo tobillos y pies del robot prototipo son 17.4 cm de altura y 15 cm de ancho, medidas que ofrecen una escala funcional y proporcional para pruebas en laboratorio. La estructura superior incorpora perforaciones estratégicamente distribuidas en el tórax para reducir el peso total (482 g sin actuadores), optimizar la relación resistencia/peso y facilitar el montaje de componentes electrónicos y mecánicos. Esta configuración proporciona una plataforma robusta para la integración de actuadores, sensores y el sistema de control, garantizando estabilidad estructural durante pruebas de equilibrio, locomoción y control en tiempo real.



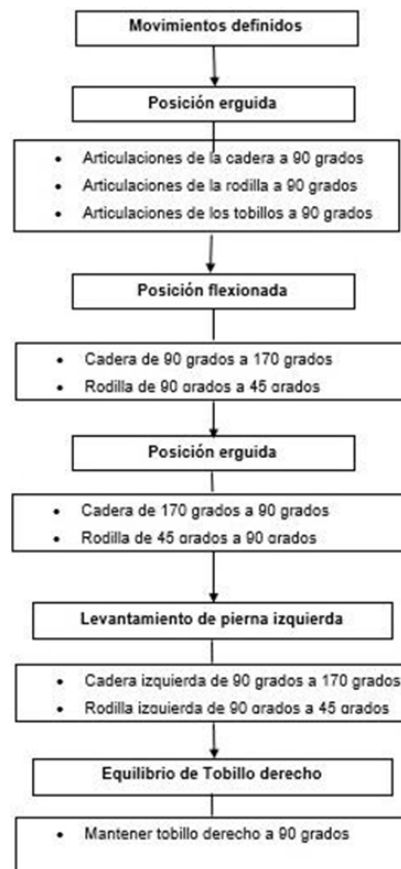
Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Parte inferior del robot bípedo con extremidades, tobillo y pie.

Programación de movimientos

La secuencia de movimientos implementada en el robot bípedo se ha diseñado para simular transiciones posturales y evaluar el desempeño del sistema de control bajo condiciones de equilibrio dinámico monopodal. El patrón postural inicial, indicado en el diagrama a bloques de la Figura 2, comienza con una postura erguida y continúa con una flexión parcial de las articulaciones de cadera y rodilla, seguida del retorno a la posición inicial. Posteriormente, se ejecuta el levantamiento de la pierna izquierda y la estabilización con un solo pie mediante el control activo del tobillo derecho, que actúa como punto de apoyo. Cada cambio de ángulo en el punto

de apoyo se mide mediante el giroscopio colocado en el tobillo de apoyo, retroalimentando la posición al servomotor correspondiente y garantizando desplazamientos controlados, evitando pérdida de equilibrio. Esta estrategia de control permite analizar la estabilidad en el punto de equilibrio y la respuesta del sistema ante perturbaciones como consecuencia de incrementar su peso.



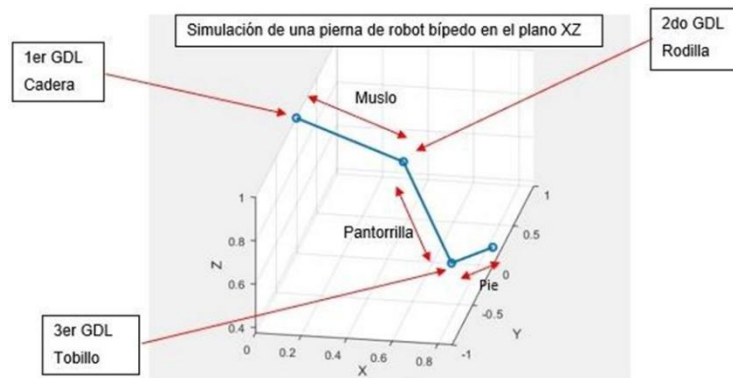
Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Diagrama de flujo postural de la secuencia de movimientos.

Modelo Cinemático Directo

El modelo cinemático directo se emplea para determinar la posición del pie del robot bípedo en función de los ángulos articulares de la cadera, rodilla y tobillo. Este análisis, desarrollado en el plano XZ , permite predecir trayectorias y validar que los movimientos respeten las limitaciones mecánicas del sistema. El robot se modela como una cadena cinemática abierta compuesta por tres eslabones: muslo (L_1), pantorrilla (L_{12}) y pie (L_3), unidos por articulaciones rotacionales ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$). La

posición de cada articulación se calcula mediante funciones trigonométricas acumulativas: La rodilla, cuya posición derivada de (L_1) y θ_1 , el tobillo en que la posición derivada de (L_2) y $(\theta_1 + \theta_2)$ así como el pie, en el cual su posición se deriva de (L_3) y $(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$. El modelo fue implementado en MATLAB para simular diversas posturas. En la Figura 3 se verifica la coherencia de los desplazamientos, obteniendo representaciones gráficas de la pierna y sus articulaciones en distintas posiciones.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Simulación de movimientos articulares en MATLAB.

Control del robot bípedo

El sistema de control del robot bípedo integra tres estrategias complementarias, seleccionadas por su eficacia en diferentes fases de operación:

- Control secuencial, el cual ejecuta instrucciones predefinidas para llevar al robot a una postura base segura. Facilita pruebas iniciales de los actuadores y la preparación para rutinas automáticas. En este caso optimiza los eventos predecibles y el arranque del sistema.
- Control por interpolación discreta, el cual genera transiciones suaves entre posturas mediante discretización de trayectorias en puntos intermedios. Se aplicó para mejorar la coordinación articular y la naturalidad del movimiento sin necesidad de control continuo.
- Control PID, el cual fue implementado en la articulación del tobillo derecho para el equilibrio en tiempo real, con retroalimentación del sensor inercial que detecta la posición y la aceleración angular. Este corrige desviaciones de

postura y mantiene estabilidad en posiciones críticas [Hongji, 2022], tales como el equilibrio monopodal que soporta variaciones en el peso del robot.

La sección del código desarrollado donde se implementa el control con ayuda del giroscopio en lenguaje en C se muestra a continuación, con la inicialización de variables:

```
void setup() { Serial.begin(11520); while (!Serial) delay(10);  
Serial.println("Iniciando giroscopio MPU6050");  
if (!mpu.begin()) {  
Serial.println("Fallo al encontrar el chip MPU6050");  
while (1) delay(10);}  
Serial.println("MPU6050 encontrado");  
mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);  
mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);  
mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_5_HZ);  
myservo.attach(servoPin); myservo.write(servo_angle);  
delay(2000);
```

Se inicializa la comunicación serial para mostrar datos, así la conexión con el giroscopio MPU6050 y se configura el rango del acelerómetro y el giroscopio. Se establece el filtro de banda (frecuencia de filtrado):

```
// Inicializar el filtro con las primeras lecturas  
for (int i = 0; i < numSamples; i++) {  
sensors_event_t a, g, temp; mpu.getEvent(&a, &g, &temp);  
roll_samples[i] = atan2(a.acceleration.y, a.acceleration.z)*180 / M_PI;  
delay(10);};
```

Aquí se recopilan varias lecturas del giroscopio para aplicar un filtro de media móvil y reducir el ruido en las lecturas de ángulo. Se obtiene una nueva lectura del giroscopio, y se calcula el ángulo roll (la inclinación) usando la misma fórmula que en el paso anterior:

```
// Obtener nueva lectura del giroscopio sensors_event_t a, g, temp; mpu.getEvent(&a, &g,  
&temp);  
float new_roll = atan2(a.acceleration.y, a.acceleration.z) * 180 / M_PI;
```

Se aplica el filtro de media móvil sumando varias lecturas del ángulo roll y promediándolas para obtener el ángulo filtrado, "filtered_roll":

```
// Aplicar filtro de media móvil roll_samples[sampleIndex] = new_roll; sampleIndex =  
    (sampleIndex + 1) % numSamples;  
float filtered_roll = 0;  
for (int i = 0; i < numSamples; i++) { filtered_roll += roll_samples[i];  
}  
filtered_roll /= numSamples;
```

La diferencia entre el "setpoint" (el ángulo inicial) y el ángulo filtrado calculado por el giroscopio es el error:

```
// Cálculo del error  
error = initial_angle - filtered_roll;
```

Se calcula la salida del PID sumando las contribuciones de cada uno de los tres componentes:

```
// Cálculo del PID integral += error * dt;  
derivative = (error - prev_error) / dt;  
float pid_output = (Kp * error) + (Ki * integral) + (Kd * derivative);
```

Se limita la salida del PID a un rango para evitar movimientos excesivos del servo:

```
// Limitar PID para evitar valores extremos  
pid_output = constrain(pid_output, -30, 30);
```

El valor calculado por el PID se agrega al ángulo base de 90°. Este valor se limita entre 0 y 180° para asegurar que el servo no exceda sus límites de movimiento:

```
// Aplicar el PID al servo  
servo_angle = constrain(90 + pid_output, 0, 180);  
myservo.write(servo_angle);
```

Se actualizan las variables de error y tiempo previos para la próxima iteración:

```
// Guardar el error y el tiempo anteriores  
prev_error = error;  
last_time = current_time;
```

Selección de hardware para el sistema de control

La selección de hardware en un sistema robótico bípedo debe cumplir con los requerimientos mecatrónicos de diseño mecánico, eléctrico y de programación, garantizando compatibilidad con los esfuerzos de torque y suministro de potencia a los servomotores del sistema, así como con las instrucciones lógicas para el control retroalimentado por sensores.

De acuerdo con la velocidad, posición y torque requerido para los movimientos humanoides que debe cumplir el robot, se seleccionó el sensor giroscópico MPU6050, el cual combina acelerómetro y giroscopio de tres ejes [Yilmazlar, 2025], permitiendo obtener en tiempo real la inclinación angular del robot (θ_x, θ_y) y su velocidad de rotación (ω_x, ω_y) . Tiene además comunicación I^2C , alta tasa de muestreo (hasta 1 kHz), adecuada para control PID e integración directa con el microcontrolador ESP32. La estimación de ángulos de fusión sensorial está dada por la Ecuación 1.

$$\theta_f = \alpha[\theta_{prev} + (\omega * \Delta t)] + [(1 - \alpha)(\theta_{acc})] \quad (1)$$

Donde:

θ_f : ángulo filtrado (*complementary filter*).

α : constante de fusión ($0 < \alpha < 1$).

θ_{acc} : ángulo estimado por el acelerómetro.

ω : velocidad angular.

El ESP32 fue elegido controlador central por su balance entre potencia de cálculo, líneas para señales PWM, buses de comunicación y soporte de periféricos. Además, cuenta con doble núcleo a 240 MHz para ejecución eficiente del algoritmo PID en tiempo real. Cuenta con 16 canales PWM para un control independiente de cada servomotor. También cuenta con 2 buses I^2C para conexión simultánea con múltiples sensores y WiFi/Bluetooth para diagnóstico y telemetría.

Servomotor MG995 y Control PID

El servomotor MG995, combinado con un controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo), permite movimientos suaves, estables y precisos al compensar

la diferencia entre la posición deseada y la actual. Sus características lo hacen adecuado para articulaciones de un robot bípedo con control en tiempo real.

Parámetros mecánicos y eléctricos de los servomotores del robot

Cada servomotor tiene un torque de parada: $10\text{ kg} \cdot \text{cm}$ a 6 V ($\approx 0.98\text{ Nm}$). Esto asegura fuerza suficiente para levantar y mantener segmentos de $\sim 10\text{ cm}$, garantizando estabilidad y capacidad de transición de peso. Cuenta con una velocidad de respuesta que va desde $0.2\text{ s}/60^\circ$ a 6 V , ideal para acciones rápidas y ajustes dinámicos del PID. Una desventaja es que tiene no-linealidades intrínsecas, es decir que presenta pequeña histéresis mecánica y ruido eléctrico, pero es funcional para prototipado y pruebas de robustez en control automático.

Selección de fuentes de voltaje DC

El voltaje nominal de cada servomotor va de 7.2 a 8 V , con una corriente máxima bajo carga de aproximadamente 800 mA con picos rápidos de corriente hasta 1.5 A . Esto es muy importante para evitar caídas de tensión que pueden afectar el torque. Por lo que se seleccionó una fuente externa regulada de 5 a 6 V , con capacidad mayor a 2 A por cada servomotor. Es conveniente separar la alimentación de potencia de las señales de control para evitar ruido e interferencia.

Monitoreo de corriente con el sensor INA219

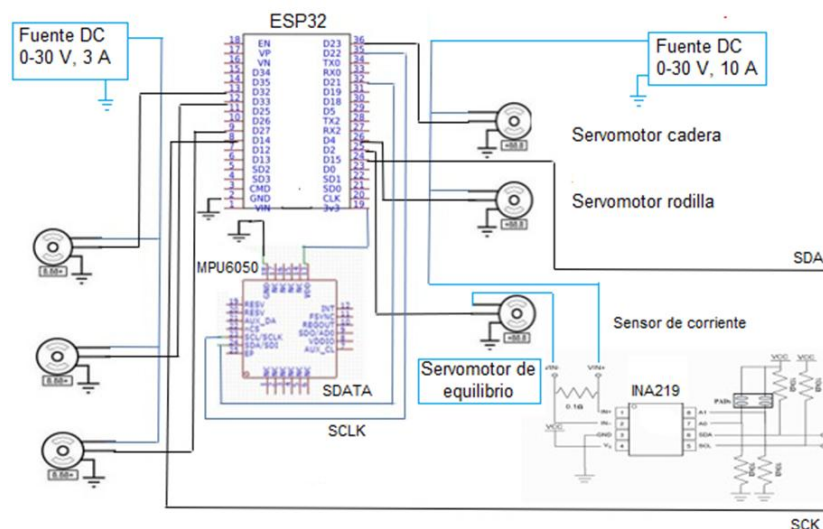
El INA219 mide corriente consumida por algún componente eléctrico, permitiendo supervisar en tiempo real el consumo de corriente y potencia de cada servomotor. Así mismo se puede relacionar la corriente consumida por el servomotor con el esfuerzo de control para llevar a cabo el equilibrio y con la energía necesaria para el equilibrio monopodal. También es posible analizar la respuesta de control según la acción de realice el robot, ya sea levantarse, equilibrarse, perturbaciones, etc. El consumo de corriente total para los servomotores del minirobot en cada movimiento se muestra en la Tabla 1. Esto asegura requerimientos eléctricos y respuesta mecánica estable en el robot bípedo y el manejo de picos de arranque. La Figura 4 muestra la arquitectura centralizada en el microcontrolador ESP32, el cual coordina

la comunicación con sensores y la activación de actuadores. El MPU6050 se conecta mediante bus I^2C , enviando en tiempo real datos de aceleración y giro para alimentar el algoritmo PID. El INA219, también usa la comunicación I^2C , mide la corriente consumida por los servomotores, permitiendo relacionarla con el esfuerzo de control de cada servomotor para el equilibrio, en particular con el del tobillo derecho.

Tabla 1 Consumo estimado para los 6 servomotores del minirobot bípedo.

Postura/movimientos	Corriente [A]
Reposo/mantener posición	0.9
Movimiento sin carga	3.6
Movimiento con carga parcial (real)	4.2
Pico de arranque simultáneo	6

Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Diagrama eléctrico del sistema automático de control de equilibrio.

Para las pruebas de equilibrio monopodal se utilizaron dos fuentes reguladas independientes. Una fuente de 5 V/3 A para el suministro de circuitos digitales y una fuente de 0 a 30 V y 6 A para la etapa de potencia de los servomotores. Para evitar caídas de tensión y ruido eléctrico, la alimentación de potencia de los servomotores está separada de la lógica del ESP32. Cada servomotor MG995 se conecta individualmente al microcontrolador mediante los canales de señal PWM y recibe su alimentación directa desde la fuente regulada. El diseño incorpora protecciones

mediante fusibles, interruptores y aislamiento en la etapa de potencia. El cableado sigue un esquema que minimiza interferencias, asegurando que las señales de control no se vean afectadas por los picos de corriente generados por los servos durante cambios bruscos de posición.

Diseño del tórax para incrementar el peso superior del robot

Se desarrolló un torso superior en el robot bípedo con el fin de incrementar paulatinamente el peso total del robot, cambiando su centro de gravedad al moverse y evaluando la estabilidad del equilibrio monopodal en cada caso, y aproximar su morfología a una figura humanoide. La incorporación de peso en el torso sirve para incrementar y simular un cambio en el peso o sobrepeso corporal de una persona, cambiando así su centro de gravedad y, por ende, incrementando la posibilidad de desequilibrio. Para el diseño del tórax se estableció como requisito el uso de aluminio 6060, priorizando la robustez estructural y la durabilidad frente a impactos y cargas dinámicas. Se calculó el torque para un servomotor MG995 con $T_{max} = 10 \text{ kg.cm}$ y una distancia, brazo de palanca/carga $d = 16.4 \text{ cm}$ (Ecuación 2).

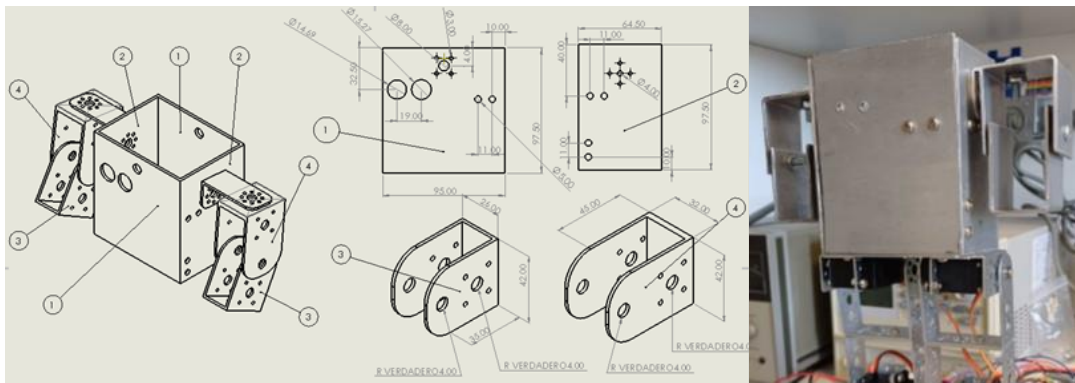
$$F_{max} = \frac{T_{max}}{d} \approx \frac{10}{16.4} \text{ kgf} \approx 0.610 \text{ kgf} \quad (2)$$

Las proporciones humanoides de referencia para este minirobot se definieron de la siguiente manera: *Torso* de 30 a 35% de la altura total; que el centro de masa fuera lo más bajo posible sin comprometer movilidad. La relación del peso en parte superior (tórax)/parte inferior (extremidades) debe ser: masa superior menor que capacidad de torque de la articulación cadera/rodillas. Así mismo se realizó una distribución de peso basada en la antropometría humana, es decir, piernas: ~ 32%, torso, 43%, cabeza, 8%, brazos, 17%. Este balance reduce sobrecargas en los servos y optimiza la eficiencia del control de movimiento.

En la Figura 5 se muestra el ensamble completo con cuatro componentes numerados:

- Caja principal perforada (Tórax, 1): Estructura cúbica con múltiples perforaciones en sus caras, diseñada para alojar elementos mecánicos o electrónicos y adicionar peso corporal.

- Placa lateral perforada (Costados del tórax, 2): Fijada a los lados de la caja principal, contiene orificios para la sujeción de otros componentes.
- Soportes laterales en forma de "U" (Antebrazos, 3): Dos piezas simétricas con perforaciones distribuidas estratégicamente, para el montaje de un mecanismo articulado.
- Placas superiores perforadas (Brazo, 4): Situadas en la parte superior de los soportes laterales en "U", permiten la fijación de otros elementos estructurales.



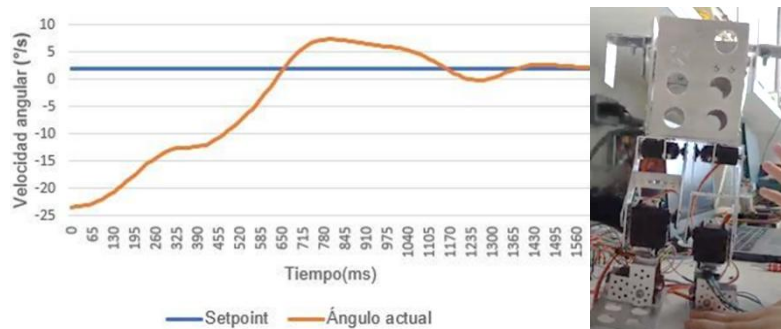
Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Vista general de la estructura superior del robot (Torso).

3. Resultados

Se hicieron pruebas de equilibrio monopodal con diferentes pesos, modificando el peso del torso (tórax) del propio robot y por consecuencia su centro de masa. La Figura 6 muestra las condiciones extremas para control de equilibrio bajo el esquema PID cuando el servomotor para el equilibrio soporta su capacidad máxima aplicando un torque de $7 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, siendo el 70%, de $10 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, que es el torque nominal del servomotor para el equilibrio en el tobillo derecho. Para evaluar la estabilidad y tiempo de respuesta del equilibrio monopodal, en la Figura 6 se muestra un ascenso más lento que en la prueba con menor carga, evidenciando mayor dificultad para alcanzar el punto de control. Relacionando la *velocidad angular* vs *tiempo*, obtenida de la *aceleración angular* proporcionada por el giroscopio, se graficó y observó un sobrepaso de $\approx 5\%$ por encima del "setpoint", seguido de oscilaciones no periódicas. El tiempo de estabilización se

extiende hasta $1,430\text{ ms}$, en comparación con una prueba realizada con menor peso ($\approx 416\text{ ms}$), el tiempo aumenta en $\approx 1,014\text{ ms}$. Esto sugiere que, por encima de estas condiciones extremas, el servo no entrega el torque esperado causando inestabilidad, debido principalmente a fallas por exceso de corriente pico o poca eficiencia debido a pérdidas internas por calentamiento en el servomotor. En cuanto a la evaluación del sobrepaso y oscilaciones, se consideró que el sobrepaso fue mayor que con cargas menores, prueba de que hay un menor amortiguamiento efectivo del sistema con máxima carga. La oscilación es más pronunciada y la estabilización resulta más errática, lo que denota más exigencia en la robustez del control frente al incremento de carga.

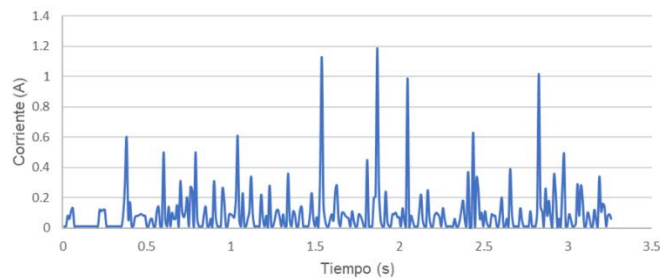


Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Respuesta extrema del sistema de control para llegar al punto de equilibrio.

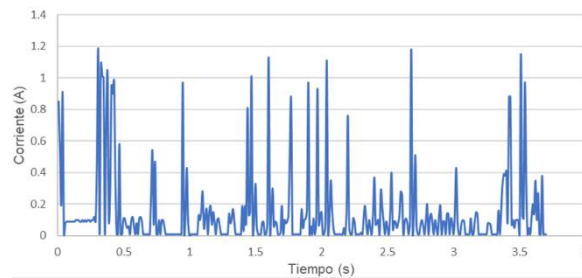
Se pudieron evidenciar deficiencias del servomotor de equilibrio. Datos del fabricante indican que el servomotor debería sostener el 100% de su torque máximo sin degradar el desempeño. En pruebas reales, por encima del 70% de carga, el servomotor de equilibrio no alcanza el objetivo en los tiempos esperados y presenta sobrepaso/oscilaciones superiores. Se midió también la corriente consumida por los servomotores donde el robot mantiene equilibrio sobre una pierna con control PID activo. Se realizaron mediciones con pesos diferentes, la primera con un peso concentrado en el torso de 480 g (torso reducido), Figura 7. La segunda con un peso de 809 g (torso completo con brazos), Figura 8. Con un peso de 480 g , la corriente medida del tobillo derecho en el inicio el primer ciclo, tomando postura erguida tiene valores de $110\text{ a }600\text{ mA}$ e inicio estable. El segundo ciclo en el punto de control de equilibrio con picos hasta 1.2 A , compensando oscilaciones.

La siguiente prueba fue con incremento de peso de 809 g, cuya respuesta de corriente del servomotor de equilibrio es mostrada en la Figura 8. Se observan transitorios de corriente debido a la aplicación del control PID y cuando corrige una perturbación al final del muestreo. En este caso la corriente del tobillo derecho tuvo incremento de los picos sostenidos de 1.2 A y mayor frecuencia de estos picos debido al aumento de carga, tanto en la fase de postura como en el equilibrio monopodal. La corriente promedio fue de 0.14 A.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Corriente en el servomotor del tobillo derecho con un peso total de 480 g.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Transitorios de corriente en el servomotor (tobillo derecho) con un peso de 809 g.

4. Discusión

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones previas que enfatizan la influencia del control PID y los sensores inerciales en la buena estabilidad dinámica de sistemas bípedos [Mikolajczyk, 2022; Liu, 2024]. El control secuencial para dar postura al robot presentó algunas respuestas inestables en el control de la posición, con variaciones energéticas notorias, lo que implicó un menor aprovechamiento del par motor disponible debido a los transitorios de corriente generados. El control por interpolación permitió un aprovechamiento más uniforme

de la energía suministrada a los servomotores, reduciendo picos de corriente y optimizando la transición entre posiciones al tomar postura para el equilibrio monopodal. En el análisis de resultados de las pruebas con diferentes cargas o pesos se determinó que el valor máximo de torque alcanzado por el servomotor utilizado para el equilibrio monopodal fue de 70% de su valor nominal. El esfuerzo de control de los servomotores, relativo a la corriente para estabilizar en un pie al robot, reflejó diferencias significativas entre las estrategias de control. El PID, particularmente en la secuencia de equilibrio, demostró una capacidad destacada para estabilizar la postura del robot frente a perturbaciones, minimizando oscilaciones y manteniendo el consumo dentro de un rango estable. Esta característica no solo contribuyó a la precisión en el punto de control, sino que también redujo sobre esfuerzos en el sistema mecatrónico al evitar transitorios mecánicos excesivos. En términos funcionales, el PID en combinación con la interpolación permitió un balance óptimo entre estabilidad y eficiencia energética, lo que valida su implementación para tareas repetitivas de rehabilitación o asistencia robótica en simulaciones de equilibrio. Estos resultados respaldan la hipótesis de que un control adaptado a la dinámica del robot puede mejorar sustancialmente su desempeño, incluso en condiciones de carga variable. El incremento de peso incrementa proporcionalmente la corriente requerida por los servomotores y las caídas de tensión por picos de sobre corriente pueden generar oscilaciones que el PID no corrige completamente. La fuente de alimentación del servomotor para el equilibrio debe ser capaz de soportar los picos o transitorios de corriente para garantizar estabilidad.

5. Conclusiones

El sistema mecatrónico diseñado para posicionar al minirobot en el punto de equilibrio monopodal, basado en control secuencial por máquina de estados para tomar postura de equilibrio, junto con el control PID para mantener dicho equilibrio, demostró mantener los valores de sobrepaso dentro del 5% promedio aceptable, el tiempo de levantamiento fue en promedio de 1650 ms en condiciones extremas al llegar al 70% del torque máximo nominal del servomotor de apoyo, añadiendo el

sobrepeso máximo en el torso del robot. La implementación del control por interpolación discreta en los servomotores redujo las oscilaciones en un 80%, logrando un consumo de corriente más estable y de menor magnitud (84.5 contra 132.5 mA sin interpolación). Esta combinación aseguró movimientos secuenciales más suaves y equilibrio satisfactorio durante acciones críticas como el mantenerse erguido en robot en un pie y con sobrepeso. Este proyecto, como herramienta biomecánica, permite analizar articulaciones en movimientos humanoides, con aplicaciones en rehabilitación y apoyo a personas con movilidad reducida, al mismo tiempo permite simular los problemas en las articulaciones al incrementar el esfuerzo de control cuando una persona tiene sobrepeso, relacionando la corriente del servomotor con el incremento de energía que se requiere en un tobillo humano natural para equilibrar el cuerpo en un solo pie, además de sentar bases para una robótica humanoide eficiente. Se sugiere como mejoras futuras el uso de servomotores con mayor torque y un giroscopio de mayor precisión para aumentar capacidad de carga y consistencia del control.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Bartyś, M., Hryniewicki, B. The Trade-Off Between the Controller Effort and Control Quality on Example of an Electro-Pneumatic Final Control Element. *Actuators*, 8(1), 23, March 2019.
- [2] Bong, J., Jung, S., Kim, J., Park, S., Standing Balance Control of a Bipedal Robot Based on Behavior Cloning. *Biomimetics*, 7(4), 232, October 2022.
- [3] Guaypatin, O., Borja, B., Villa, M., Roldán, Á., Tapia, Robot Humanoide Controlado por Sensores IMU y Ópticos en el Contexto de las Nuevas Tecnologías en la Educación. *Revista Boletín REDIPE*, 8(3), pp. 185–192, marzo 2019.
- [4] Hongji, L., Zhengguo, Z., Zhongkai S., Yibin, L., Xuewen, R., Teng, C., Guoteng, Z., Humanoid Biped Robot Locomotion Via Quadratic Programming with Compound Constraints. *Proceedings of the 2022 International Symposium on Biomimetic Intelligence and Robotics (ISBIR)*, *Procedia Computer Science*, 209, pp. 67-75, November 2022.

- [5] Huang, Z., Wuang, Z., Wu, K., Zhu, S., Nie. L., Liang., Liang, Y., Yang, L., Zhang, Y., Quasi-Static Balancing for Biped Robot to Perform Extreme Postures Using Ducted-Fan Propulsion System. *Robotics and Autonomous Systems*, 165, 104429, July 2023.
- [6] Lima, C., Khan, S., Tufail, M., Shah, S., Maximo, M., Humanoid Robot Motion Planning Approaches: A Survey. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110 (86), pp. 86-110, June 2024.
- [7] Liu, X., Sun, Y., Cao, K., Zhang, X., Shen, H., Chen, G., Xu, J., Ji, A., Development of Wheel-Legged Biped Robots: A review. *Journal of Bionic Engineering*, 21, pp. 607-634, February 2024.
- [8] López-Cortés, F.J., Jiménez-Martínez, Cerino-Jiménez, R., Pérez-Tellez, F., Pinto, D., Training and Transfer of a PID Balance Controller for Quadruped Robots Using Artificial Neuronal Networks. *Computación y Sistemas*, 28(4), pp. 2395-2405, December 2024.
- [9] Mikołajczyk, T., Mikołajewska, E., Malinowski, T., Kłodowski, A., Pimenov, D., Paczkowski, T., Hu, F., Giasin, K., Mikołajewski, D., Macko, M., Recent Advances in Bipedal Walking Robots: Review of Gait, Drive, Sensors and Control Systems. *Sensors*, 22, 4440, June 2022.
- [10] Tafur, J., Moreano, G., Sánchez, Á., *Teoría Clásica de Control Automático*. Editorial Alfaomega Marcombo, Primera edición, ISBN e-book :978-8426738028, España, pp. 1-268, 2024.
- [11] Yilmazlar, E., Kuscu, H., Experimental Research of Control Moment Gyroscope Effect on Bipedal Robot Walking Trajectory. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 47(197), pp. 1-16, March 2025.