



ROBOT EQUILIBRISTA SOBRE DOS RUEDAS EN CONFIGURACIÓN DIFERENCIAL PARA CONCURSO DE ROBÓTICA RIOTRONIC 2018.

Fausto Ramiro Cabrera Aguayo¹

Docente, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Facultad de Informática y Electrónica
fausto.cabrera@esPOCH.edu.ec

Dario Gabriel Armijos Vilema²

Estudiante, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Facultad de Informática y Electrónica
dario.armijos@esPOCH.edu.ec

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Fausto Ramiro Cabrera Aguayo y Dario Gabriel Armijos Vilema (2018): "Robot equilibrista sobre dos ruedas en configuración diferencial para concurso de robótica Riotronic 2018", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (noviembre 2018). En línea

[//www.eumed.net/rev/caribe/2018/11/robot-concurso-robotica.html](http://www.eumed.net/rev/caribe/2018/11/robot-concurso-robotica.html)

Resumen— Se construyó un robot equilibrista sobre dos ruedas en configuración diferencial para concurso de robótica RIOTRONIC 2018, para ello se tomó en cuenta el reglamento correspondiente para participación en el concurso, con éstas consideraciones, se armó un robot de dos puntos de apoyo capaz de mantener el equilibrio sin soporte externo, el robot fue construido considerando las especificaciones de seguridad, por lo tanto no dañó ni el ambiente ni a otros robots, pesa 5.2 kg, utilizó motores de dc, las dimensiones del robot fueron de 12x7x16 cm. El robot logró equilibrarse automáticamente y su desplazamiento fue controlado mediante una unidad de radio frecuencia. Todas éstas consideraciones permitieron que el robot concursara en el evento RIOTRONIC 2018.

Abstract— A balancing robot over two wheels with a differential configuration for RIOTRONIC contest was built, for that, the contest rules were considered in the building process, a robot with two support points was built able to keep the balance without an external support, the robot consider the security specifications, thus it didn't damage the environment neither the other ones, 5.2 kg weight with dc motors, Dimensions 12x7x16 cm. The robot was balanced automatically an the motion through RF control. All this considerations allowed the robot participation in RIOTRONIC 2018

Índice de términos— Equilibrista, configuración diferencial, robot móvil, PID, Riotronic 2018, carrera de robots equilibristas, RF control

Index Terms— Balancing, differential conguration, mobil robot, PID, Riotronic 2018, balancing races, control por radio frecuencia.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots auto equilibristas han sido de gran interés en los últimos años. En si básicamente es un péndulo invertido sobre dos ruedas. El robot balancín es un sistema inestable por naturaleza. (Sundín C., 2013) La complejidad en el diseño de este tipo de robots hace que necesite ser controlado constantemente para mantenerse en sentido vertical y que la reacción ante perturbaciones externas sea rápida y no oscilante.

Una aplicación comercial de éste tipo de robots se da principalmente en lo relacionado al transporte personal, volviéndose popular con el lanzamiento del Segway, actualmente es usado en la industria, centros comerciales, el turismo entre otras. Su arquitectura lo hace más atractivo que los vehículos convencionales de dos ruedas, además, su configuración diferencial y estructura de 2 puntos de apoyo permiten que el equipo sea capaz de realizar giros bruscos y adentrarse en espacios reducidos.

Debido a la relativa facilidad de construcción de éste tipo de robots, su bajo costo de implementación y el sistema físico que presentan, son ideales en el estudio de la robótica y una base fundamental en el desarrollo académico en cuanto a sistemas de control se refiere, existe por lo tanto una extensa cantidad de documentación que se refiere a éste tipo de robots, es por ello que actualmente los consursos de robótica en todo el mundo lo consideran como un elemento digno de evaluar en competencia. Grupos estudiantiles alrededor del mundo actualmente crean sus robots e implementan algoritmos de control cada vez más sofisticados, impulsando de ésta manera, un desarrollo acelerado de la temática.

En el Ecuador, la universidades actualmente promueven el desarrollo tecnológico a tal punto que, actualmente, estudiantes universitarios, investigadores y profesores han logrado reconocimientos internacionales en los principales escenarios a nivel internacional en robótica, todo esto se ha logrado gracias a la organización de eventos locales que han permitido el avance tecnológico. RIOTRONIC 2018 es un concurso internacional de robótica cuya sede es la ciudad de Riobamba en Ecuador, organizado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, acoge a participantes tanto nacionales como internacionales, en su VIII edición ha considerado la competencia de carrera de balance, la cual tiene como objetivo generar el interés de participantes en la temática de control automático, operación a distancia y robótica móvil.

El reglamento para la participación en el evento es el siguiente:

1. Se debe de armar un robot de uno o dos puntos de apoyo, que pueda mantener el equilibrio sin soporte externo.
2. El robot debe ser construido de tal manera que no dañe el ambiente u otros robots. Ver las especificaciones de Seguridad.
3. No puede llegar a pesar más de 20 kg, ni podrá utilizar un motor de combustión interna o externa.
4. Dimension máxima de 1m x 1m x 1m
5. El equilibrio debe ser automático. La dirección puede ser controlada por una unidad de R/C.

Es necesario cumplir con las características que se detallan en el reglamento además de lograr el objetivo de recorrer una determinada distancia en el menor tiempo posible manteniendo en todo momento el equilibrio del robot, esto conlleva a realizar un diseño mecánico para el robot móvil, su configuración, control de equilibrio y control de desplazamiento a distancia.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Robot Balancín

Los robots balancín se basan en el principio del péndulo invertido el cual consiste en un péndulo o varilla que gira libremente sobre uno de sus extremos. El origen de estos robots se sitúa por los años 1986 en la universidad de Electro comunicaciones de Chofu Japón, el profesor Kazuo Yamafuji creó el primer robot capaz de simular el comportamiento de un péndulo invertido. (Feng Q., 1988) El diseño del robot consta de un eje provisto de ruedas y un carro que contenía los dispositivos de control y estabilización.



Figura 1. Robot de Kazuo Yamafuji

Fuente: (Feng Q., 1988)

Un prototipo más actual fue desarrollado por el año 2000 (Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, 2002) en los laboratorios de electrónica industrial del "Swiss Federal Institute of Technology" en el cual añadieron pesas para simular el peso de una persona, el prototipo llamado "Joe" es la base de los SETWAY.



Figura 2. Robot "Joe"

Fuente : (Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, 2002)

El último desarrollo de estos robots se basa en el equilibrio sobre una bola para lo cual constan de un algoritmo preciso de control de tres motores diferentes para su movimiento omnidireccional, el desplazamiento necesita un tipo de rueda especial que permite moverse en todas las direcciones. (Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, 2002)

3. METODOLOGÍA

3.1 Cinemática directa de un robot móvil diferencial

El modelo cinemático del robot permite establecer la posición del robot en función del tiempo a partir de su configuración, dimensiones y acción de elementos actuadores, la solución del problema cinemático directo y el modelo cinemático inverso permite al robot dar soluciones de automatización, en un robot de configuración diferencial este problema ya ha sido abordado, obteniendo modelos matemáticos sencillos que darán un punto de partida para el desarrollo e investigación en el campo de aplicación. La ecuación 1, expresa la cinemática directa de un robot móvil de configuración diferencial el cual se desplaza a una velocidad en el espacio en función de las velocidades angulares que componen el sistema motor rueda. (Cabrera & Hidalgo, 2018)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \frac{\sin \theta}{2} & -R \frac{\sin \theta}{2} \\ R \frac{\cos \theta}{2} & R \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 Dinámica de un robot móvil diferencial

El modelo dinámico es otra parte fundamental del análisis de robots, en el caso de robots móviles, ayuda al control y a la simulación de sistemas, una representación matemática muy básica que desprecia fuerzas de coriolis y fuerzas de gravedad se representan por las ecuaciones 2 y 3, donde se expresa el torque en función de las componentes inerciales, de masas y las fuerzas de rozamiento. (Cabrera & Hidalgo, 2018) (Cabrera & Hidalgo, 2018) (Cabrera & Hidalgo, 2018)

$$A\ddot{\theta}_1 + B\ddot{\theta}_2 = \tau_1 - k\dot{\theta}_1 \quad (2)$$

$$B\ddot{\theta}_1 + A\ddot{\theta}_2 = \tau_2 - k\dot{\theta}_2 \quad (3)$$

Donde A y B vienen dados por 4 y 5.

$$A = \left[\frac{mr^2}{4} + \frac{I_c + r^2}{l^2} + I_r \right] \quad (4)$$

$$B = \left[\frac{mr^2}{4} - \frac{I_c + r^2}{l^2} + I_r \right] \quad (5)$$

3.3 Chasis

El diseño del chasis es un factor importante en el éxito o no de la implementación del robot, dado que según su forma permitirá realizar desplazamientos con mayor o menor exactitud al recorrer la pista. Para este caso se diseñó un chasis en mdf que considera la sujeción de los motores y la adición de ruedas de 5cm de diametro, se considera que la electrónica tiene que estar distribuida de tal manera que la distribución de masas no afecte el desempeño del robot. Se ha considerado ubicar el elemento sensor en el centro de masa del robot para facilitar el control del robot y distribuir de esta manera las cargas a los motores, alargando la vida útil de los controladores electrónicos.



Figura 3. Chasis del robot de balance.

3.3 Principio de Funcionamiento

Un péndulo invertido es un péndulo que tiene su masa por encima de su punto de pivote.

El péndulo invertido es conocido por ser uno de los problemas más importantes y clásicos de la teoría de control. Considerando que un péndulo normal es estable cuando se cuelga hacia abajo, un péndulo invertido es inestable, y debe ser equilibrado activamente con el fin de permanecer en posición vertical. El sistema está compuesto por un carro en el cual se coloca una barra que puede girar libremente. El objetivo es que el carro se desplace para compensar el movimiento de caída al que tendera la barra, y como consecuencia esta debe mantenerse en equilibrio.

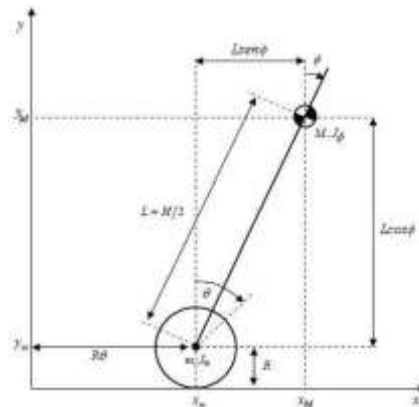


Figura 4. Diagrama de funcionamiento del péndulo invertido.

Fuente: (Anna Patete*, 2018)

3.1 Electrónica

3.1.4 Acelerómetro

Uno de los elementos que utiliza una IMU para el cálculo de la posición y la orientación de un objeto en un espacio tridimensional es el acelerómetro. Este instrumento está destinado a obtener medidas absolutas de las aceleraciones en tres ejes: X, Y y Z.

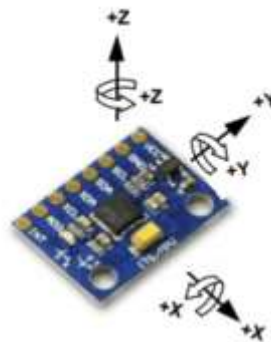


Figura 5. Unidad de navegación inercial MPU-6050 y sus ejes.

Fuente: (MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 MPU-6000/MPU-6050 Product Specification, 2013),
(«GIROSCOPIO ACELERÓMETRO MPU-6050 | Labotec», s. f.)

Especificaciones del MPU-6050

- Salida digital de 6 ejes.
- Giroscopio con sensibilidad de ± 250 , ± 500 , ± 1000 , y ± 2000 dps
- Acelerómetro con sensibilidad de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$
- Algoritmos embebidos para calibración
- Sensor de temperatura digital
- Entrada digital de video FSYNC

- Interrupciones programables
- Voltaje de alimentación: 2.37 a 3.46V
- Voltaje lógico: 1.8V±5% o VDD
- 10000g tolerancia de aceleración máxima. («GIROSCOPIO ACELERÓMETRO MPU-6050 | Labotec», s. f.)

3.1.5 Motorreductores

Los motorreductores juegan un papel fundamental, para lograr el balance es necesario tener la suficiente velocidad sin sacrificar la fuerza necesaria para vencer el peso del robot mas la inercia que este genere al salir de su posición de equilibrio. («Juego de 2 Llantas de Plástico 65 mm X 26 mm llanta – Carrod», s. f.)



Figura 6. Motorreductor amarillo 9v, con su rueda acoplada.

Fuente: <https://www.carrod.mx/products/motor-reductor-6-v-200-rpm-3-v-150-rpm>

3.1.6 Driver del Motor L298N

El módulo puente H **L298N** es una tarjeta para el control de motores de corriente directa, también funciona para motores a pasos. La tarjeta está construida con un circuito integrado **L298N**, el cual dispone en su interior de 2 puentes H independientes con capacidad de conducir 2 amperios constantes o 4 amperios en picos no repetitivos, debido a las características de los motores la tarjeta puede manejar las corrientes requeridas, no es necesario un cálculo exhaustivo para el dimensionamiento de motores y drivers debido a que se los ha adquirido en un kit, ante lo cual el único problema se presentaría si el cuerpo del robot tiene una mala distribución de masas o sea demasiado pesado, también hay que considerar la inercia, para ello y que no se eleve dicho valor se considerará en software un intervalo de estabilidad para control pequeño. («Módulo L298N Driver Puente H L298 - Geek Factory», s. f.)



Figura 7. Módulo L298N.

3.2.4 Controlador Microprocesador ATMEGA 328

El Atmega328 AVR 8-bit es un Circuito integrado de alto rendimiento que está basado en un microcontrolador RISC, se ha considerado el microcontrolador por su costo, velocidad de procesamiento y disponibilidad de entradas y salidas analógicas suficientes para la implementación del proyecto. (Atmel, 2016)

Para el controlador tomamos en cuenta las entradas y salidas que este tiene para poder ingresar las lecturas de los sensores y salidas pwm. Lo cual se muestra en la siguiente tabla.

FUNCION	PUERTOS	NUMERO DE PIN	
Serial	PD0	2	Rx
	PD1	3	Tx
PWM	PB1	15	Enable 1
	PB2	16	Enable 2
PUENTE H	PD2	4	
	PD3	5	
	PD4	6	
	PD7	13	
SENSORES SHARP	PC0	23	Sensor 1 Frontal
	PC1	24	Sensor 2 Late. Der
	PC2	25	Sensor 3 Late. Izq
PULSADORES	PB0	14	
	PB3	17	
	PB4	18	
LED	PB5	19	
	PC3	26	
	PC4	27	

TABLA 1 . Distribución de pines en el microcontrolador

Fuente: datasheet ATmega

4. CONTROL Y ALGORITMO

Para conservar el balance del robot los motores deben contrarrestar el fallo del robot, para esto el balancín requiere principalmente de un sistema de control realimentado. El elemento de lectura de la consigna es el sensor MPU-6050 el cual da aceleración y rotación en los tres ejes (x, y, z), estos son usados por el microcontrolador para saber la orientación actual del robot, el elemento corrector es la combinación de las ruedas con el motor.

Para el algoritmo del robot se utilizó librerías externas, (Br3ttb, s. f.) por facilidad y fácil comprensión, estas fueron principalmente del MPU-6050, L289N y PID para el control.

La librería "LMotorController" es usada para manejar los motores con el módulo L289N, las librerías "I2CDev" y "MPU6050_6_Axis_MotionApps20" son para lectura del MPU6050.

```
#include <PID_v1.h>
#include <LMotorController.h>
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
```

En teoría de control (K. Ogata, 2010) si ajustamos la dinámica del sistema a un sistema de orden 2 tipo 0, un controlador PID con acción de control derivativa pequeña, se lleva la salida del sistema a la consigna con un error en estado estacionario pequeño, en este caso la posición del robot. Es necesario encontrar las ganancias del controlador PID, denominadas k_p , k_i y k_d respectivamente.

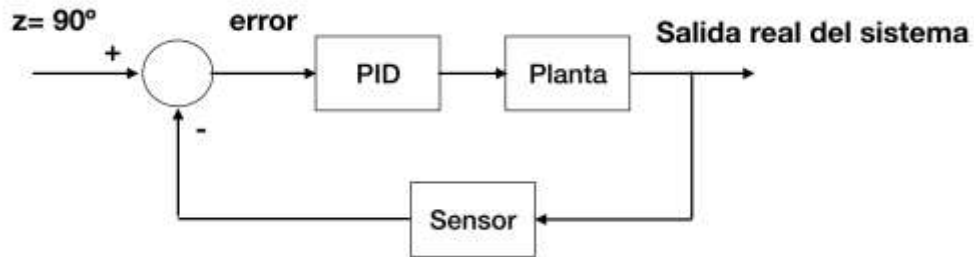


Figura 8. Diagrama de bloques del Robot

En el robot la entrada fue declarada por software. El MPU6050 lee la inclinación actual y alimenta al algoritmo del PID el cual realiza cálculos para actuar sobre los motores y mantener estable la posición.

Para calcular los valores de PID se utilizó una afinación manual poniendo los valores de k_p , k_i y k_d en cero, luego aumentando k_p hasta encontrar la ganancia donde el sistema es marginalmente estable. Utilizando el método de ziegler nichols encontraremos los valores para k_d y k_i

Para realizar el desplazamiento del robot se utilizó un comando de la librería del L298N y un condicionamiento para que cuando se estabilice el robot avance mientras compensa la posición.

```
"motorController.move(output, MIN_ABS_SPEED);"
```

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

EL diseño mecánico permite el desplazamiento del robot móvil en configuración diferencial, lo que le da al robot un alto grado de maniobrabilidad, en las imágenes podemos observar el robot terminado y la distribución de los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que lo componen, cabe recalcar que se ha realizado la distribución de peso de los elementos experimentalmente, ante lo cual no se puede asegurar que el centro de masas y por ende la ubicación del sensor se encuentren desplazados del centro geométrico del robot, la posible consecuencia de éste hecho se verá reflejado ya sea en el desempeño del robot o en el consumo desequilibrado de carga de los actuadores.



Figura 9. Vista frontal del Robot de Balance.



Figura 10. Vista Lateral del Robot de Balance.

Otra posible consecuencia de las fallas en diseño podría ocasionar problemas en el control PID implementado para equilibrar el robot, pero, tras realizar varias pruebas se logró sintonizar el controlador. La tabla 2 muestra los valores de prueba tomados previo a la sintonización funcional.

Kp	Ki	Kd
0	0	0
10	0	0
20	0	10
35	0.5	35
50	0.8	50
50	1	55
50	1.4	60

TABLA 2 .Tabla de valores experimentales de los valores del PID

Se obtuvo una mejor respuesta con los valores experimentales de:

$K_p=50$, $K_d=60$, $K_i=1,4$

Se realizaron pruebas de funcionalidad en 2 campos de importancia para la participación en el concurso de robótica, la primera corresponde al equilibrio del robot ante perturbaciones externas, para ello se sometió al robot a varias inclinaciones y se comprobó si se lograba estabilizar en la consigna, la tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Inclinación/Pruebas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Grados	¿Se estabiliza?	¿Se estabiliza?	¿Se estabiliza?	¿Se estabiliza?
2°	Si	Si	Si	Si
5°	Si	Si	Si	Si
8°	Si	No	No	Si
9°	No	No	Si	No
10	No	No	No	No

TABLA 3 .Tabla de pruebas de funcionamiento de equilibrio autónomo.

Con los resultados obtenidos podemos garantizar el equilibrio autónomo del robot siempre y cuando la inclinación del eje vertical no sea mayor a los 5 °, éste dato también aporta con un punto de partida para la evaluación de funcionalidad del segundo requerimiento, el cual es desplazar el robot mediante un control remoto. El desplazamiento se logra inclinando al robot hacia el sentido desplazamiento y acelerando los motores, para ello se han realizado pruebas de funcionalidad de desplazamiento a varios ángulos, la tabla 4 detalla los resultados obtenidos.

Inclinación/Pruebas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Grados	¿avanza sin caer?	¿avanza sin caer?	¿avanza sin caer?	¿avanza sin caer?
2°	No	Si	No	No
5°	Si	Si	Si	Si
8°	Si	No	No	Si
9°	No	No	Si	No
10	No	No	No	No

TABLA 4 .Tabla de pruebas de funcionamiento de desplazamiento RC.

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos, en el único caso en el que el robot avanza sin caer en cuando lo ubicamos a 5 grados de la consigna, con ello se logra desplazar el robot y por lo tanto se puede participar en el evento Riotronic 2018 con un robót equilibrista funcional.

6. CONCLUSIONES

El diseño del robot se ha realizado de manera experimental, sin considerar un dimensionamiento analítico, partiendo simplemente de elementos comerciales funcionales que se encuentran en el mercado y tratando de no sobrepasar medidas de prototipos similares creados con dichos elementos, tras realizar el diseño mecánico se ha realizado el control autónomo de equilibrio del robot, el cual se ha logrado sintonizar utilizando un método eurístico, después se ha montado un sistema de comunicación remota mediante RF para lograr el desplazamiento del robot, tras realizar varias pruebas se ha conseguido los datos necesarios para lograr un desplazamiento y por lo tanto un robot funcional para la competencia de robótica, también se han considerado los requerimientos de la competencia concernientes a dimensión, peso, criterios de construcción y programación, se concluye el trabajo de investigación con un robot funcional con equilibrio autónomo de configuración diferencial apto para competencia en RIOTRONIC 2018.

7. REFERENCIAS

Grasser, F. D. (202). JOE: A mobil, inverted pendulum. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 107-144.

Geek Factory. (20 de Junio de 2018). Obtenido de <https://www.geekfactory.mx/tienda/motores-y-controladores/modulo-puente-h-l298n/>

Setway. (14 de Julio de 2018). Obtenido de <http://www.segway.com>

Thorstensson, S. C. (2013). Autonomus balancing robots. *Chalmers University of Tecnology*.

Invente Sense. (14 de Junio de 2018). Obtenido de <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250>

Yamafuji, K. F. (1988). Design and simulation of control systems of an inverted pendulum. *Robotica*, 235-241.

Rodriguez, F. S. (2011). Robot Autonomo para recorrer un laberinto. *Proyecto codiseño de aplicaciones*.

Autores, V. (14 de Junio de 2018). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas_microelectromec%C3%A1nicos

Labotec. (14 de Junio de 2018). Obtenido de https://www.labotec.pe/en_US/shop/product/frente-j-8-giroscopio-acelerometro-mpu-6050-281

Luisllamas. (14 de Junio de 2018). Obtenido de <https://www.luisllamas.es/>.

Invente Sense. (14 de Junio de 2018). Obtenido de <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

Anna Patete*, I. A. (14 de Junio de 2018). *Researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/237039113_fig2_Figura-2-Vista-lateral-del-pendulo-invertido-sobre-dos-ruedas.