

# Implementación de controladores difusos de postura y marcha en un robot bípedo

Allen E. Sánchez\* Fernanda Merino-Morales\*  
Edmundo Rocha-Cózatl\*

\* *Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,  
UNAM, Mexico City, Mexico (e-mail: aesofunam@gmail.com ,  
mfda.merino@gmail.com, e.rocha.cozatl@comunidad.unam.mx)*

---

## Resumen

En un trabajo previo, la marcha del robot bípedo de 12 GDL se planificó fuera de línea y se implementó en lazo abierto; como consecuencia, su funcionamiento resultó adecuado únicamente al caminar en un plano horizontal, lo cual restringía sus aplicaciones reales. En este trabajo se propone un controlador difuso, compuesto por dos módulos, que cierra el lazo de control por medio de la medición de la inclinación del torso del robot y proporciona la compensación en ángulo sobre las trayectorias planificadas previamente, todo ello con el fin de estabilizar la postura y marcha del robot ante variaciones de pendiente en la superficie de desplazamiento.

*Keywords:* Robot bípedo, Control, Lógica difusa, PID autosintonizable

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Los robots bípedos comparten la forma de locomoción con los seres humanos. Por ello, son particularmente adecuados para desempeñar sus tareas en ambientes diseñados y habitados por personas. Gracias a esta capacidad, la investigación sobre robots de servicio ha prestado interés a la robótica bípeda; a pesar de los grandes esfuerzos realizados, la capacidad de movilidad de estos robots aún es limitada comparada con la humana.

El objetivo es que un robot bípedo sea capaz de desenvolverse en ambientes no controlados, es decir, que pueda desplazarse en cualquier terreno e interactuar con el medio. Para ello el robot debe ser capaz de lidiar con las perturbaciones e incertidumbres del medio en el que se desempeña. Para lograrlo, se han realizado diversas investigaciones enfocadas en la implementación de controladores que estabilicen la marcha en ambientes no controlados basados en el criterio *Zero Moment Point* (ZMP) (Vukobratovic M. (2004)) y en el movimiento del centro de masa (CoM, por sus siglas en inglés) (Vukobratovic M. (2004)).

El criterio de estabilidad basado en el ZMP establece que si el ZMP se mantiene dentro del polígono de soporte, se asegura la estabilidad de la marcha. Las acciones de control se enfocan en corregir el error de posición del ZMP si éste se encuentra fuera. Por otra parte, la orientación del CoM está relacionada con la estabilidad de la caminata y la postura, ya que el movimiento del CoM, inherentemente, determina la posición del ZMP.

En la literatura se encuentran diferentes enfoques en el diseño de controladores con el objetivo de estabilizar la marcha; sin embargo, lo más común es realizar un control de seguimiento de trayectorias dinámicamente estables de referencia que son previamente planeadas y calculadas. En

este contexto de seguimiento, se han explorado métodos de control diferentes, incluyendo control por modos deslizantes (Vázquez-Alberto (2016)), donde es necesario contar con las mediciones de la posición angular de cada articulación del robot. También se han implementado métodos de control en tiempo continuo basados en controladores PID (Serhan H. (2008)), por calculado, entre otros.

En (Ching-Long (1991)) se presenta un controlador autosintonizable mediante lógica difusa para que un robot bípedo de 12 GDL tolere perturbaciones sin caerse en soporte doble por medio de la modificación de la posición de la línea de acción del peso del robot. Este control tiene como objetivo llevar al robot a una configuración donde las reacciones de fuerza provenientes del soporte doble y las fuerzas gravitatorias no generen momentos angulares en los ejes cartesianos “X” y “Y”.

En (Jung-Yup Kim (2007)) se desarrolla un esquema de control dividido en tres grupos de controladores: el control de balance del robot en tiempo continuo (usando el criterio del ZMP), control del patrón de marcha (orientación del CoM) y el control predictivo de pisada (prevención de caída). Para el control del patrón de marcha se emplea un control de orientación del CoM (*Upright pose control*) utilizando un controlador PI, el cual se basa en la obtención de la inclinación global del suelo utilizando un sensor inercial (IMU, por sus siglas en inglés). El esquema de control completo genera una compensación en la trayectoria calculada fuera de línea.

En la presente contribución se implementa un controlador PID autosintonizable mediante lógica difusa (PID-ASLD) para estabilizar la marcha de un robot bípedo de 12 GDL basado en el control del patrón de marcha de (Jung-Yup Kim (2007)). La diferencia es que un sistema difuso se encarga de sintonizar las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  del controlador PID con base en tres parámetros: el error, la suma del error y el cambio del error. Se emplea este tipo de controlador ya que en la literatura (Batikan E. Demir

---

\* Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de UNAM-DGAPA bajo el proyecto PAPIIT IN113915. “Planeación de trayectorias y control de marcha de un robot bípedo de 12 GDL”.

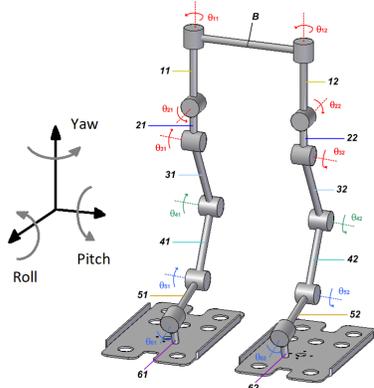


Figura 1. Convención de ángulos y eslabones del robot bípido Scout (Narváez-Aroche (2010))

(2016) y Sadeghian R. (2016)) se destacan como principales características su desempeño y adaptabilidad sobre los PID tradicionales. La efectividad de este controlador se verifica mediante su implementación en el robot bípido comercial Scout, presentado en la Sección 2.

Las acciones de control están diseñadas para corregir la orientación del CoM con respecto a una referencia. Las mediciones requeridas para la implementación del controlador son únicamente cuatro, la orientación en Pitch y Roll del centro de masa y su variación respecto al tiempo.

A continuación se presenta la organización este artículo. La arquitectura del robot Scout puede verse en la Sección 2. En la Sección 3 se muestran los conceptos preliminares para el planteamiento del controlador PID autosintonizable con lógica difusa. En la Sección 4 se plantea la propuesta de los controladores de orientación del CoM y se presenta la metodología para su implementación. Los resultados obtenidos son presentados en la Sección 5. En la Sección 6 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

## 2. ARQUITECTURA DEL ROBOT BÍPEDO SCOUT

El robot bípido Scout fue diseñado por Lynxmotion <sup>TM</sup>, consta de 12 articulaciones, 6 en cada pierna. Las dos piernas están unidas por una cadera denominada eslabón central, en total el robot tiene 13 eslabones. Cada una de sus articulaciones está actuada mediante servomotores.

Para identificar a cada eslabón de manera inequívoca, se establece la siguiente nomenclatura: la cadera se identifica con la letra  $B$  y los eslabones de las piernas con las etiquetas  $L_{ni}$ ; donde  $1 \leq n \leq 6$  se encuentra determinada por su distribución en relación a la cadera, correspondiendo  $n = 1$  a los eslabones unidos a ésta y  $n = 6$  a los que cumplen el papel de pies. Se asigna  $i = 1$  a los eslabones de la pierna izquierda e  $i = 2$  a los eslabones de la pierna derecha. La rotación de los ejes de los servomotores se describe por medio de los ángulos  $\theta_{ni}$ , siendo  $ni$  el subíndice del eslabón sujeto a su eje y la de su barra correspondiente en el modelo simplificado que se muestra en la Figura 1.

En la Tabla 1, se muestra la organización articular del robot bípido. Haciendo una comparación Humano-Robot, el robot bípido tiene tres grupos de articulaciones, uno que conforma la cadera, otro la rodilla y otro el tobillo.

Tabla 1. Descripción de las articulaciones Robot Bípido Scout

Articulaciones Robot Bípido Scout			Giro
Cadera	Servomotor 11	Servomotor 12	Yaw
	Servomotor 21	Servomotor 22	Roll
	Servomotor 31	Servomotor 32	Pitch
Rodilla	Servomotor 41	Servomotor 42	Pitch
Tobillo	Servomotor 51	Servomotor 52	Pitch
	Servomotor 61	Servomotor 62	Roll

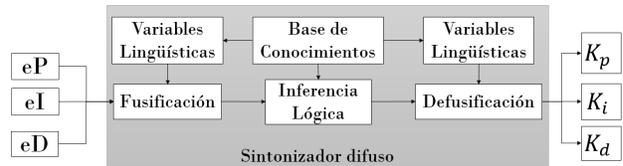


Figura 2. Esquema de sistema difuso para la obtención de las ganancias de un controlador PID

## 3. CONTROL DIFUSO

En años recientes la inteligencia artificial ha tomado gran relevancia, ya que por medio de ésta es posible transformar decisiones humanas a un lenguaje comprensible por las máquinas; tal es el caso de la lógica difusa.

Un algoritmo de control difuso consiste en un conjunto de reglas de decisión basadas en heurística, muy atractivo cuando el sistema controlado no se encuentra bien definido o modelado o su modelo es demasiado complejo. La teoría difusa utiliza reglas *IF-THEN* (SI-ENTONCES) para indicar la relación entre las entradas y las salidas del controlador; a estas reglas se les llama base del conocimiento. Además, utiliza variables lingüísticas para describir las características del sistema (Ponce-Cruz (2010)).

Un controlador PID autosintonizable se puede considerar como un controlador PID cuyas ganancias cambian con respecto a las variaciones que tienen el error, el cambio del error y la suma del error (Ponce-Cruz (2010)). La acción de control se calcula como un PID tradicional, mostrada en la ecuación (1).

$$u(t) = K_p(e(t)) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d(\dot{e}(t)) \quad (1)$$

Las reglas del sistema difuso para sintonizar las ganancias del PID influyen en la estabilidad del sistema en lazo cerrado, ya que determinan la evolución en el tiempo de dichas ganancias.

El esquema de obtención de las ganancias del controlador PID por medio de lógica difusa se muestra en la Figura 2. Las entradas al sistema difuso se denominan  $e_P$  (error),  $e_I$  (integral del error) y  $e_D$  (derivada del error); las cuales pasan a un proceso de fusificación que consiste en mapear los valores de esas mediciones del error a un valor válido en el lenguaje en el que están basadas las reglas difusas propuestas. Dependiendo del valor de esas mediciones fusificadas se toma una decisión. Esta decisión, para poder ser implementada, necesita ser mapeada de vuelta al lenguaje original del sistema; a este proceso se le conoce como defusificación. Las salidas del sistema difuso son las ganancias del controlador PID:  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ .

## 4. CONTROLADOR PROPUESTO

### 4.1 Estructura del controlador

Para lograr que la marcha del robot bípedo Scout sea estable, fueron planeadas y calculadas trayectorias fuera de línea basadas en el criterio de estabilidad ZMP por medio de un modelo dinámico simplificado del robot (Merino-Morales (2016)); sin embargo, estas trayectorias calculadas no previenen que el robot caiga como resultado de perturbaciones o incertidumbres del ambiente. Debido a esto, es necesario un control retroalimentado para mantener el balance en tiempo continuo, que compense las trayectorias de las articulaciones teóricamente calculadas ( $\theta_{ni}$ ). En resumen, la estructura del controlador se puede ver como una combinación *feedforward* + *feedback*.

El modelo dinámico de un robot bípedo es complejo y altamente no lineal, por lo que una solución para su control es dividir esta tarea en varias subtareas de control.

Se propone dividir el control del robot bípedo en dos partes. **Control A:** *Control de orientación de Pitch y Roll del CoM* que actúa durante la marcha y en una postura estática. El **Control B:** *Control de distancia entre el CoM y tobillos* que estabiliza la postura del robot.

En la Figura 3 a) y 3 b) se muestra el principio de funcionamiento del control de orientación en dirección Pitch para estabilizar la postura y la marcha, respectivamente. Las acciones de control están programadas para seis servomotores divididos en las dos piernas. La acción de control es diferente para pendientes positivas o negativas. En una pendiente positiva el robot mantendrá su estabilidad haciendo más pequeña la distancia del CoM a los pies para disminuir la posibilidad de caída. En el caso de las pendientes negativas, el CoM se debe alejar de los pies para mantener un mejor equilibrio y contrarrestar las fuerzas debidas a la gravedad.

La Figura 3 c) muestra el principio de funcionamiento de la acción de control de orientación del CoM en dirección Roll para la estabilización de la postura. El control en dirección Roll es más complejo que en dirección Pitch, ya que primero se debe lograr que la cadera y los tobillos se adapten al suelo y también se debe tomar en cuenta la distancia de los pies a la cadera tal que la proyección del CoM en el piso se mantenga dentro del polígono de soporte. Esta distancia entre cadera y pies es distinta para cada pierna, como se muestra en la Figura 3 c), y dependerá totalmente del ángulo medido por la IMU en dirección Roll: si el ángulo es positivo, la pierna izquierda se flexiona más que la derecha para que la longitud de esta pierna sea más pequeña que la de la pierna derecha; y viceversa, si la pendiente es negativa. Se puede observar que esta acción de control se lleva a cabo por la modificación de la posición angular de articulaciones en dirección Pitch.

### 4.2 Diseño del controlador

En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques para el control del robot bípedo. Este sistema cuenta con dos controladores PID, uno para la dirección en Pitch y otro para Roll y sus respectivos sintonizadores difusos. Las entradas de referencia son  $\theta_{Pitch} = 0^\circ$  y  $\theta_{Roll} = 0^\circ$ , mientras que la comparación entre el ángulo de referencia y el medido

se definirá como error. Las señales de error obtenidas son *errorPitch* y *errorRoll*. Para medir la orientación en Pitch y Roll del robot bípedo se utilizó un sensor inercial situado en el eslabón *B* (cadera). El error, la integral y derivada del mismo son las entradas de los sintonizadores difusos y de los controladores PID; estos controladores son los encargados de la tarea de **control A**. Las salidas de los sintonizadores difusos son las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de los controladores PID, mientras que las salidas de éstos últimos son las compensaciones sobre ciertas articulaciones del robot para mantener su balance ante una perturbación.

Adicionalmente al control de orientación del CoM, se cuenta con un controlador difuso que únicamente funciona cuando el robot está estático y en soporte doble. Éste es el encargado de la tarea de **control B**, cuyo objetivo es mantener la estabilidad en dirección Roll. La entrada de este controlador es el error en el ángulo Roll; y sus salidas,  $a_D$  y  $a_I$ , son las compensaciones angulares necesarias para que se mantenga el balance del robot. Este controlador es seleccionado difuso para simplificar los cálculos que de otra forma se realizarían con el modelo cinemático.

Finalmente, las salidas de los tres controladores son sumadas a la posición angular teórica de cada articulación ( $\theta_{ni}$ ) obtenida previamente en la planeación de trayectorias. Cabe señalar que durante la marcha  $a_D = 0$  y  $a_I = 0$ .

Las posiciones angulares en las que se aplica la acción de control en dirección Pitch son:  $\theta_{31}$  y  $\theta_{32}$ , en la cadera. En la rodilla:  $\theta_{41}$  y  $\theta_{42}$  y en los tobillos:  $\theta_{51}$  y  $\theta_{52}$

Las acciones de control para corregir la orientación en dirección Roll se aplican en las posiciones angulares de la cadera:  $\theta_{21}$  y  $\theta_{22}$  y en las de los tobillos:  $\theta_{61}$  y  $\theta_{62}$

En las ecuaciones (2) y (3), se muestra la configuración de las leyes de control implementadas para modificar las posiciones angulares de las articulaciones del robot. En ellas se calcula una compensación del tipo PID ( $PID_{Pitch}$  o  $PID_{Roll}$ ) que será sumada a la posición angular de las trayectorias de referencia, según el caso. En la ecuación (4), se definen las compensaciones PID en dirección Pitch y Roll. En la ecuación (2), se suma una compensación por el control de postura en dirección Roll.

$$\theta_{mi_{modificado}} = \theta_{mi} \pm PID_{Pitch} \pm a_S \quad (2)$$

$$\theta_{ni_{modificado}} = \theta_{ni} \pm PID_{Roll} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} PID_{Pitch} &= K_{p_{Pitch}}(e_{Pitch}) \pm K_{i_{Pitch}} \sum_0^t e_{Pitch}(\tau) \Delta\tau \pm \\ &\quad \pm K_{d_{Pitch}}(e_{rate_{Pitch}}) \\ PID_{Roll} &= K_{p_{Roll}}(e_{Roll}) + K_{i_{Roll}} \sum_0^t e_{Roll}(\tau) \Delta\tau \pm \\ &\quad \pm K_{d_{Roll}}(e_{rate_{Roll}}) \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $i = 1$  para la acción de control de la pierna izquierda, e  $i = 2$  para la derecha.  $n$  toma los valores (2 y 6), para modificar las articulaciones de la cadera y tobillos, *respectivamente*, en dirección Roll.  $m$  toma los valores (3, 4 y 5), para compensar las articulaciones de la cadera, rodillas y tobillos, *respectivamente*, en dirección Pitch. La compensación  $a_S$  toma el valor  $a_D$  cuando  $i = 1$  y  $a_I$  cuando  $i = 2$ . Se consideró  $\Delta\tau = 8 [ms]$  debido a los componentes utilizados.

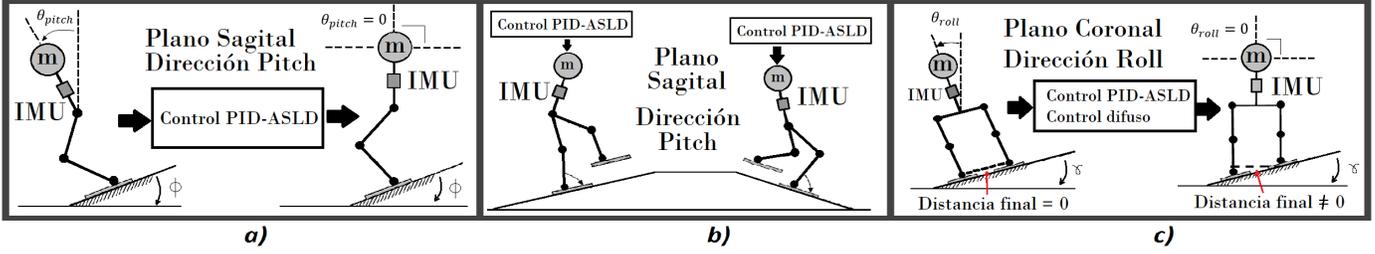


Figura 3. Principio de funcionamiento de control de orientación el Pitch y Roll para el balance de postura de un robot bípido y durante la marcha del mismo (basadas en las de Jung-Yup Kim (2007))

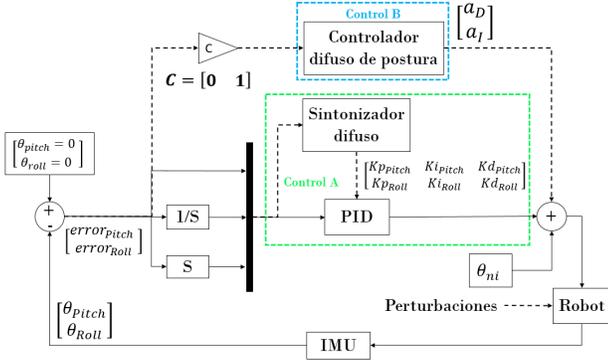


Figura 4. Esquema de control del robot bípido

### 4.3 Sintonización

Se clasificó la magnitud del error, del cambio del error y de la suma del error de la siguiente manera: negativa grande (**NG**), negativa pequeña (**NP**), cero (**CE**), positiva pequeña (**PP**) y positiva grande (**PG**).

Las ganancias se clasifican: baja, media baja, mediana, media y alta (**GB**, **GMB**, **GM**, **GMA** y **GA**).

Las reglas para las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  están basadas en experimentos realizados con el robot bípido.

Para sintonizar las ganancias  $K_p$ , de cada PID, se eligió un conjunto de reglas orientadas para que la dinámica de estas ganancias tengan un comportamiento asintóticamente estable. Cerca de un punto de equilibrio virtual (se propone este punto donde el error, el cambio del error con respecto al tiempo y la suma del error son iguales a cero), se tiene una ganancia  $K_p$  baja (**GB**), pero si en algún momento se aleja de este punto de equilibrio la ganancia crecerá, haciendo que el sistema en lazo cerrado evolucione de tal manera que tienda a regresar a dicho punto y  $K_p$  a ser una ganancia baja.

Las reglas para las ganancias  $K_i$  se eligieron con el objetivo de evitar que la acción de control se incremente desfavorablemente cuando la suma del error ( $\sum_0^t e_{pitch}$ ) sea grande, por lo que éstas se incrementan cuando se está en la vecindad del punto de equilibrio virtual. Se consideró que la suma del error afecta la dinámica del sistema en lazo cerrado, incrementando el tiempo de asentamiento; así que las ganancias  $K_i$  dependen del error y de la suma del mismo, es decir, dos entradas determinan su valor.

Las ganancias  $K_d$  dependen del error y del cambio del error ( $e_{rate}$ ). Las reglas se colocaron para que el comportamiento de  $K_d$  sea asintóticamente estable. Este comportamiento se definió con el siguiente razonamiento: conforme

Tabla 2. Reglas para  $K_p$  de  $PID_{Pitch}$

Ganancia $K_p$					
$e_{rate} \setminus e$	NG	NP	CE	PP	PG
NG	GA	GMA	GM	GMA	GA
NP	GMA	GM	GMB	GM	GMA
CE	GM	GMB	GB	GMB	GM
PP	GMA	GM	GMB	GM	GMA
PG	GA	GMA	GM	GMA	GA

Tabla 3. Reglas para  $K_i$  de  $PID_{Pitch}$

Ganancia $K_i$					
$\sum_0^t e_{pitch} \setminus e$	NG	NP	CE	PP	PG
NG	GB	GMB	GM	GMB	GB
NP	GMB	GMB	GMA	GMB	GMB
CE	GM	GMA	GA	GMA	GM
PP	GMB	GMB	GMA	GMB	GMB
PG	GB	GMB	GM	GMB	GB

Tabla 4. Reglas para  $K_d$  de  $PID_{Pitch}$

Ganancia $K_d$					
$e \setminus e_{rate}$	NG	NP	CE	PP	PG
NG	GA	GMA	GM	GMA	GA
NP	GA	GMA	GMB	GMA	GA
CE	GA	GMA	GB	GMA	GA
PP	GA	GMA	GMB	GMA	GA
PG	GA	GMA	GM	GMA	GA

el sistema se aleje del punto de equilibrio, más trabajo le costará volver, por ende lo hará en un mayor tiempo. Con el objetivo de reducir el tiempo de asentamiento, pero manteniendo la ganancia  $K_d$  lo bastante pequeña para evitar efectos desestabilizantes, se utilizó la misma configuración que para  $K_p$ ; sin embargo, se eligió el cambio del error como entrada preponderante, ya que  $K_d$  influye en la dinámica del sistema en lazo cerrado.

Las Tablas 2, 3 y 4 contienen las reglas para la sintonización de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , respectivamente, para el controlador PID en dirección Pitch. Las funciones de membresía de estas reglas puede verse en la Figura 5; éstas se eligieron triangulares y trapezoidales debido a su facilidad de cálculo, ahorrando recursos computacionales.

La selección de las funciones de membresía para el control en dirección del ángulo Roll se hace de manera similar que para el ángulo Pitch, al igual que el diseño del comportamiento deseado de las ganancias.

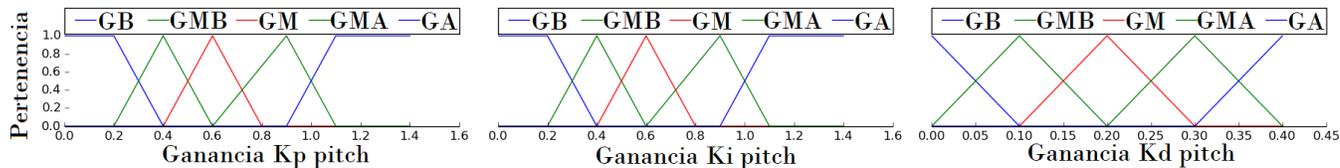


Figura 5. Funciones de membresia para las ganancias a)  $K_p$  b)  $K_i$  c)  $K_d$  en dirección Pitch

## 5. RESULTADOS

En la Figura 6 se puede apreciar el comportamiento del error en dirección Pitch (Figura 6 a)) y la sintonización de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  (Figura 6 b), c) y d), respectivamente), que tuvieron lugar en una prueba con el robot en marcha, realizada sobre una pendiente de  $10^\circ$  positivos. El robot comenzó la marcha en una pendiente de  $10^\circ$  y en las figuras antes citadas puede observarse que durante los primeros dos segundos las ganancias sufren una adaptación a la pendiente por medio del control de postura. Después de los primeros dos segundos comienza la marcha y como la pendiente es constante durante ésta, se puede ver que después de adaptarse, las ganancias no tienen grandes variaciones; sin embargo, éstas son periódicas dependiendo de la fase del ciclo de marcha en la que se encuentre el robot. También se observa que el error oscila alrededor de  $0^\circ$ , con el fin de mantener un desplazamiento estable (sin caerse).

Con el fin de observar la evolución de las ganancias ante el incremento del error, se realizó una prueba para el control postural, en dirección Pitch, en la cual, la superficie de desplazamiento sufrió variaciones de pendiente repentinas cada 10 [s] (Figura 9). El robot inicia sobre una superficie con  $0^\circ$  de inclinación, la cual va variando cada 10 [s] a  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $0^\circ$ . Se observa la adaptación de las ganancias en el transitorio y se comprueba el comportamiento propuesto en la Sección 4. La magnitud máxima de cada ganancia es similar durante los tres transitorios, debido a que la magnitud del error durante estos es casi la misma.

En la Figura 7 a) y b) se observa, en color negro, las posiciones angulares teóricas y en color rojo, la modificación de los ángulos provenientes de las trayectorias teóricas de las articulaciones 31 y 32. Las posiciones angulares son compensadas con las acciones de control de la ecuación (2). La trayectoria de color rojo se satura por abajo en  $0^\circ$  y por arriba en  $180^\circ$ , que son las máximas posiciones angulares que pueden adoptar los servomotores empleados; esto ocurre en todas las articulaciones. En esta figura se puede ver que después de los dos segundos de adaptación a la pendiente, las compensaciones angulares son casi las mismas durante todo momento, ya que la inclinación del piso durante la marcha fue constante y el robot no sufrió de perturbaciones de magnitud grande durante ésta.

La importancia de esta prueba radica en que la trayectoria previamente calculada fue hecha tomando en cuenta que el robot caminaba sobre el piso plano y el controlador adapta esta trayectoria planeada en condiciones ideales a una marcha sobre un terreno que no fue previsto en ella.

Para mayor detalle del funcionamiento del control de la marcha y postural se puede consultar:

<https://www.youtube.com/watch?v=TPskJykRhyY&t=1s>.

En este video se muestra el desempeño del controlador ante

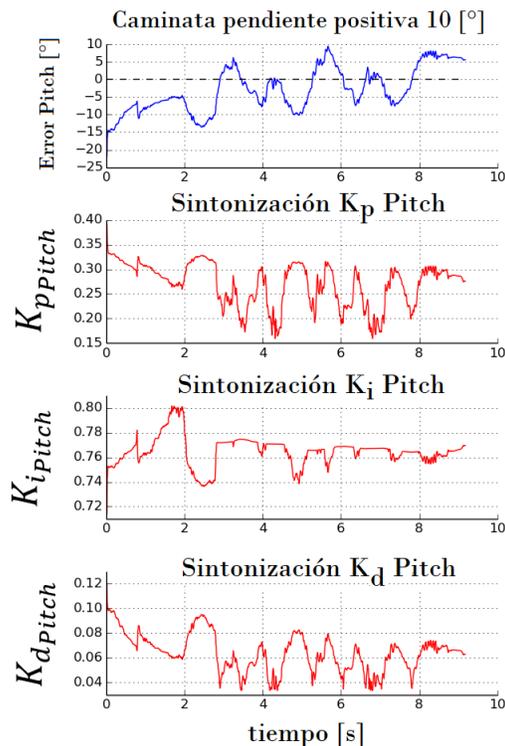


Figura 6. a) Evolución del error. Sintonización de las ganancias: b)  $K_p$ , c)  $K_i$ , d)  $K_d$ .

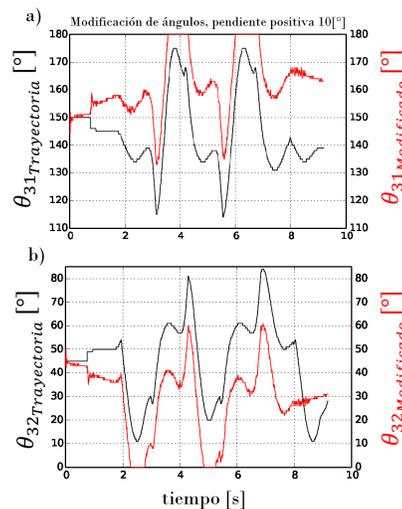


Figura 7. Ángulo teórico contra el ángulo compensado. a) Articulación 31. b) Articulación 32.

variaciones imprevistas de pendiente y por la aplicación de fuerzas puntuales.

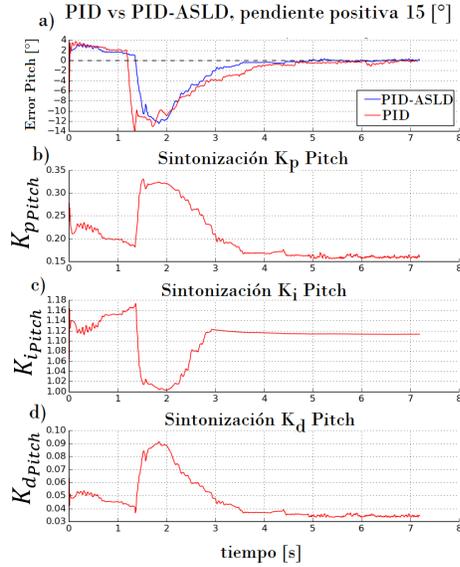


Figura 8. Control postural. Evolución del error y de las ganancias ( b)  $K_p$  c)  $K_i$  d)  $K_d$ ).

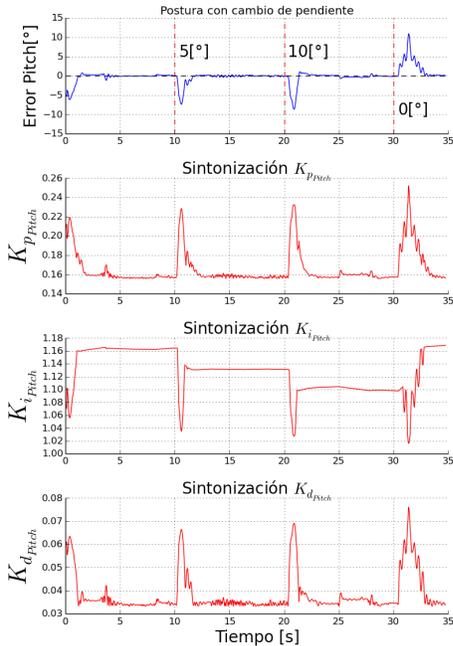


Figura 9. Control postural con pendiente variable. Evolución del error y de las ganancias ( b)  $K_p$  c)  $K_i$  d)  $K_d$ ).

El control postural se probó poniendo al robot sobre un terreno plano que incrementa gradualmente su pendiente hasta  $15^\circ$ . La evolución de las ganancias se puede ver en la Figura 8, donde se aprecia como  $K_p$  y  $K_d$  aumentan con respecto a la magnitud del error, que aumenta en el tiempo ya que la pendiente se incrementa después del primer segundo y se mantiene constante a partir del quinto. Se comparó el control postural mediante un PID-ASLD contra un PID de ganancias fijas ( $K_p = 0.248$ ,  $K_i = 0.804$ ,  $K_d = 0.0570$ ). El resultado se muestra en la Figura 8 a), donde se puede ver que la magnitud del error en Pitch con el controlador PID-ASLD es menor, casi en todo momento, con respecto a la del controlador PID

tradicional. Sin embargo, el desempeño del PID tradicional es similar al sintonizado con lógica difusa, esto se debe a que sus ganancias se calcularon realizando un promedio de la variación de las ganancias obtenidas por el sintonizador difuso. Este es un resultado útil desde el punto de vista práctico ya que en el caso de no poder implementar un PID con ganancias variables, se podrían sintonizar ganancias estáticas que proporcionen un buen desempeño al controlador de manera relativamente sencilla.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La modificación de ángulos teóricos previamente calculados en ciertas articulaciones del robot bípedo permitió proponer y desarrollar un controlador basado en la orientación del CoM, con el cual se mantuvo una postura y marcha estable a pesar de las perturbaciones, tales como, el cambio de pendiente en el suelo o la acción de fuerzas puntuales. El diseño modular de los controladores permitió seccionar el problema de control en tareas más simples y finalmente, la unión de los controladores permitió el desarrollo de un controlador capaz de mantener una marcha estable. Se está trabajando actualmente en diseñar e implementar un controlador basado en el criterio del ZMP que mejore la robustez de la estabilidad de la marcha y que verifique que el controlador aquí planteado mantenga, en todo momento, la posición del ZMP dentro del polígono de soporte. La interacción entre ese control y el aquí presentado sería un trabajo a futuro.

## REFERENCIAS

- Batikan E. Demir, et. al. (2016). Real-time trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle using a self-tuning fuzzy proportional integral derivative controller. *Int. J. of Micro Air Vehicles*.
- Ching-Long, et. al. (1991). Fuzzy logic force control for a biped robot. *IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*.
- Jung-Yup Kim, et.al. (2007). Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor. *J. of intelligent and Robotic Systems*.
- Merino-Morales, F. (2016). *Planeación de trayectorias para un robot bípedo con un modelo parametrizado carro-mesa*. Tesis, Univ. Nacional Autónoma de México.
- Narváez-Aroche, O. (2010). *Modelo cinemático y dinámico de un robot bípedo de doce grados de libertad internos*. Tesis de Maestría, Univ. Nacional Autónoma de México.
- Ponce-Cruz, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alfaomega, Ciudad de México, 1a edición.
- Sadeghian R., et. al. (2016). An experimental study on the pid and fuzzy-pid controllers on a designed two-wheeled Self-Balancing autonomous robot. *4th Int. Conf. on Control, Instrumentation and Automation*.
- Serhan H., et.al. (2008). Dynamic control strategy of a biped inspired from human walking. In *Proc. of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 342–347. IEEE.
- Vázquez-Alberto, L. (2016). *Seguimiento de trayectorias para un robot bípedo por modos deslizantes continuos*. Tesis de Maestría, Univ. Nacional Autónoma de México.
- Vukobratovic M., Borovac B. (2004). Zero-moment point-thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 157–173.