

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



MODELAMIENTO Y ESTRATEGIA DE CONTROL
VIRTUAL DE LA CAMINATA DE UN ROBOT BÍPEDO

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

ALFARO PAUCARCHUCO, EDISON EFRAIN

PROMOCIÓN 2011-II

LIMA - PERÚ

2012

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis padres y a mis hermanos, por su comprensión y ayuda en cada una de mis decisiones. A mis tíos; Roberto, Olga, Delia, y Alicia que tuvieron una palabra de apoyo en todo momento desde el inicio de esta tesis. A mi abuela Guillermina y a mi tío Jesus que siempre han sido un ejemplo, un estímulo a querer vivir y sacarle todo el jugo a la vida.

Agradecimientos

Quiero agradecer a aquellas personas que compartieron sus conocimientos conmigo para hacer posible la conclusión de esta tesis. Especialmente agradezco a mi asesor El Ing. Ricardo Rodriguez que siempre mostró todo su apoyo como docente y asesor en el desarrollo de este trabajo. Gracias al Ing. Sarmiento que me facilitó las herramientas de su taller mecánico, así como también a los Msc. Cesar Anchayhua y David Achanccaray quienes me motivaron en el inicio de este proyecto. Gracias a mis compañeros del grupo de investigación de sistemas de control e inteligencia artificial - GISCIA por las gratas experiencias compartidas en esta importante etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDOS

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1.	
INTRODUCCIÓN	4
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Asimo	5
1.1.2. Bart robot	6
1.1.3. Spring flamingo	7
1.1.4. Rabbit robot	8
1.1.5. Andy ruina's lab	10
1.2. Motivación de la investigación	10
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Alcances	13
1.5. Limitaciones	13
CAPÍTULO 2.	
MODELAMIENTO	14
2.1. Centro de masa y centro de presión	15
2.2. Péndulo invertido	16
2.3. Modelo acrobot	18
2.4. Modelo bípedo sin masa	20
2.5. Modelo virtual	22
2.5.1. Modelo virtual de una pierna	24
2.5.2. Modelo virtual para dos piernas	27
CAPÍTULO 3.	
ESTRATEGIA DE CONTROL	30
3.1. Propiedades del algoritmo de control	31
3.2. Estrategia de control	32
3.2.1. Estabilización de altura	33
3.2.2. Estabilización del cabeceo	33
3.2.3. Estabilización de velocidad	34
3.2.4. Estabilización de balance	35

3.2.5. Transiciones de soporte	36
3.3. Modelo virtual y control local	38

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 39

4.1. Mecánica del robot	40
4.2. Interface simulink	40
4.2.1. SimMechanics	41
4.2.2. Simulación del robot	42
4.3. Estructura de control	43
4.4. Resultados	47

CAPÍTULO 5.

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO RPY 49

5.1. Diseño del mecanismo para el RPY	49
5.1.1. Diseño del soporte	50
5.2. Sensores y actuadores	51
5.2.1. Sensor de posición y velocidad angular	52
5.2.2. Sensor de inclinación	52
5.2.3. Servomotor	53
5.3. Interfaz electrónica	53
5.3.1. Microprocesador	53
5.3.2. Driver de sensores	54
5.3.3. Driver de potencia	55
5.4. Estrategia de control aplicado al robot	56
5.4.1. Algoritmo de la Caminata	56
5.5. Resultados experimentales	59

CONCLUSIONES 61

BIBLIOGRAFÍA 63

APÉNDICE A.

Especificaciones del prototipo RPY 66

A.1. Estructura	66
A.1.1. Planos	66
A.2. Controlador	69
A.3. Sensores y actuadores	83

APÉNDICE B.

Diagramas de simulación 85

B.1. Simulación del piso	85
B.2. Esquema de la ley de control	87
B.2.1. Parámetros de fase del pie derecho	87
B.2.2. Parámetros de fase del pie izquierdo	89

LISTA DE FIGURAS

1.1. Robot Asimo (2010) de la compañía Honda, cuenta con 34 grados de libertad, velocidad de desplazamiento de 2.7 km/h	6
1.2. Robot Barth (2003) de Hannover University, con un movimiento planar logra una caminata lenta y estable.	7
1.3. Spring Flamingo (2000), MIT. Utiliza actuadores elásticos	8
1.4. Rabbit Robot (2004), GIPSA-lab, CNRS	9
1.5. A la izquierda McGeer caminando sobre una rampa no visible de poca profundidad, a la derecha bípedo pasivo 3D en el cual los brazos oscilantes están unidas rígidamente a las patas opuestas. ambos desarrollados por el laboratorio de biorrobótica y locomoción - Cornell University	11
1.6. Movilidad asistida por exoesqueleto, El exoesqueleto tiene tres y dos grados de libertad activos y pasivos por pierna respectivamente, Florida Institute for Human and Machine Cognition.	12
2.1. Ilustración del centro de presión (circulo azul), que es el punto sobre el cual se aplica la resultante de todas las presiones ejercidas sobre el pie.	15
2.2. Modelo del robot bípedo con un solo soporte. m es la masa del cuerpo, l es la longitud de la pierna, y θ_1 es el ángulo de postura de la pierna	17
2.3. Modelo acrobot de un grado de libertad y un cuerpo inercial	18
2.4. Modelo pierna bípedo sin masa (izquierda) y su equivalente diagrama de cuerpo libre (derecha). El robot bípedo tiene una masa m e inercia J . El punto P es la locación del centro de presión del pie.	20
2.5. Componente virtual. $\{B\}$ es el marco de acción. $\{A\}$ es el marco de reacción. $\{O\}$ es el marco de referencia. CV representa el componente virtual, este es dibujado esquemáticamente para mostrar como actúa entre los marcos $\{A\}$ y $\{B\}$	23
2.6. Modelo Virtual de una sola pierna. El marco de reacción $\{A\}$ tiene la misma orientación del marco de referencia $\{O\}$ de manera que ${}^O R_A = I$	24
3.1. Estabilización del nivel de cabeceo de la cintura mediante un mecanismo virtual torsional resorte-amortiguador	34

3.2.	Variación de la ubicación del centro de presión en el pie de apoyo	35
3.3.	Oscilacion de una pierna, mientras la otra se encuentra como soporte	36
4.1.	Diseño mecánico del robot bípedo en SolidWorks, se consideró dimensiones reales de los motores DC, reductores y encoders.	41
4.2.	Componentes de la librería SimMechanics de Simulink	42
4.3.	Simulación de una articulación, se considera: una condición inicial, señal PWM al actuador, sensor en el eje del motor, y la revolución que conecta la cadera con el fémur derecho.	43
4.4.	Simulación de todas las articulaciones del robot, una señal de torque actua sobre cada motor para luego sensor cada motor tiene una señal de torque como entrada.	44
4.5.	Simulación del robot bípedo en el entorno de Simulink, del cual conserva propiedades mecánicas importadas del diseño en SolidWorks.	44
4.6.	Esquema de control del robot bípedo	45
4.7.	Bloque control de estados el cual denota la secuencia de fases para cada pierna de forma paralela	46
4.8.	Resultado de la secuencia de simulación de la caminata bípeda obtenida desde el entorno de Simulink.	47
4.9.	Variación angular de las uniones del pie derecho para un ciclo de caminata.	48
4.10.	Variación angular de las uniones del pie izquierdo para un ciclo de caminata.	48
5.1.	Mecanismo RPY	50
5.2.	Diseño del mecanismo prototipo RPY en SolidWorks	51
5.3.	Mecanismo de soporte transversal, compuesto de dos rodamientos ubicados en las uniones, y dos pines que permiten mayor grado de movimiento	52
5.4.	Kit Experimenter TMDSDOCK28335 de Texas Instruments	54
5.5.	Esquema electrónico del RPY	55
5.6.	Filtro analógico	55
5.7.	Driver de potencia	56
5.8.	Estados de máquina usado para la caminata del RPY	58
5.9.	Secuencia de la caminata bípeda del prototipo RPY	60
A.1.	Ensamble del mecanismo RPY	67
A.2.	Soporte del servomotor	68
A.3.	Unión del sevomotor	70
A.4.	Unión de la cadera y pierna	71
A.5.	Soporte de servomotor del tobillo	72
A.6.	Barras de unión de pierna	73
A.7.	Barra de soporte del pie	74
A.8.	Barra de soporte del pie	75
A.9.	Soporte principal	76

A.10.Kit Experimenter 1	77
A.11.Kit Experimenter 2	79
A.12.Kit Experimenter 3	80
A.13.Kit Experimenter 4	81
A.14.Kit Experimenter 5	82
A.15.Simulación del circuito de sensor de posición y velocidad angular .	83
A.16.Respuesta del circuito Filtro, del sensor angular	83
A.17.Diseño de la placa de filtro de señales ADC	84
B.1. Diagrama de interacción entre los pies del robot y un nivel de piso	85
B.2. Definición de la acción en la planta del pie	86
B.3. Controlador simple PID	86
B.4. Parámetros de la fase uno en el pie derecho	88
B.5. Parámetros de la fase dos en el pie derecho	90
B.6. Parámetros de la fase tres en el pie derecho	91
B.7. Parámetros de la fase cuatro en el pie derecho	92
B.8. Parámetros de la fase uno en el pie izquierdo	93
B.9. Parámetros de la fase dos en el pie izquierdo	94
B.10.Parámetros de la fase tres en el pie izquierdo	95
B.11.Parámetros de la fase cuatro en el pie izquierdo	96

LISTA DE TABLAS

4.1. Masas y dimensiones del modelo de simulación del robot en Solid-Works	40
5.1. Masas y dimensiones del prototipo RPY	50
5.2. Características técnicas del servomotor Futaba	53
5.3. Parámetros de control del algoritmo de la caminata del RPY . . .	59

PRÓLOGO

En la actualidad el avance en robótica humanoide muestra robots cada vez más parecidos al ser humano, estos son capaces de desarrollar tareas cada vez más complejas como; subir escaleras, correr, saltar, etc. Sin embargo, aún se está lejos de lograr la libertad de movimiento de los seres humanos. Una de las tareas complejas del movimiento humano es la locomoción bípeda, el hecho de emular la caminata humana ha motivado la investigación y aplicación de diversos métodos de control, tales como: control de trayectoria por cinemática inversa, que es usado en robots manipuladores; control de modelo virtual, que se usa en esta tesis pues ofrece un control más robusto y natural; y por último la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial como machine learning, que actualmente continua en investigación y que el modelo planteado en esta tesis es fácilmente adaptable para ese tipo de técnicas; etc. Todos estos métodos mencionados tienen el mismo objetivo, el de lograr una caminata estable.

El estudio en este campo permite entender mejor la caminata humana para después poder aplicarlos en el diseño de prótesis, evaluación de patologías musculares, rehabilitación muscular, animación para videojuegos y películas, etc. Esta tesis se refiere al modelamiento y control de la caminata bípeda de un robot de seis grados de libertad. El modelamiento del robot se desarrolla mediante la conexión de un mecanismo resorte-amortiguador virtual entre el pie y la cadera del robot. Se plantea también una estrategia de control a base de transiciones

de estados que se ejecutaran para las dos piernas de forma independiente en un determinado tiempo.

Se optó por la simulación del sistema planteado en el software de Matlab, que ofrece herramientas de robótica, estas simulaciones realizadas muestran que utilizando los modelos antes mencionados el robot puede caminar, se optó también por la construcción de un robot prototipo que servirá para la validación del modelo y estrategia de control planteados.

Por último, El modelo dinámico del robot en un plano sagital es suficiente para entender una posterior caminata tridimensional en un terreno plano, pues esta es totalmente desacoplada de la dinámica frontal y transversal, de tal manera que el control de cada etapa, puede ser analizado por separado. Para éste estudio, se ha organizado el trabajo en cinco capítulos que serán expuestos de la siguiente forma:

En el **capítulo I**, se realiza una introducción a esta tesis, los objetivos, alcances, limitaciones, y un recuento de trabajos desarrollado por otros autores relacionados al tema.

En el **capítulo II** se realiza una descripción de conceptos básicos que existen en la caminata bípeda, tales como: el centro de masa y centro de presión; péndulo invertido; modelo estandar del acrobot; y el modelo del bípedo sin masa. Estos conceptos son necesarios para entender el modelo virtual propuesta para esta tesis, tanto para una pierna como para ambas.

El **capítulo III** presenta las propiedades del algoritmo de control, así como las condiciones básicas que se deben lograr para una caminata estable.

En el **capítulo IV** se presentan los resultados de la simulación del modelo virtual y estrategia de control planteados en el capítulo 2 y 3.

En el **capítulo V** se describe la implementación del prototipo RPY: el diseño mecánico, sensores y actuadores utilizados, la interfaz electrónica y por último los resultados experimentales.

El **apéndice A** presenta las especificaciones adicionales de la construcción del mecanismo RPY, así como detalles del controlador, de los sensores y actuadores, y de la tarjeta interfaz análoga. En el **apéndice B** se muestran detalles de los diagramas de simulación del piso y los esquemas de la ley de control planteados anteriormente, los cuales fueron realizados en el entorno de simulink.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La investigación en robots Bipedos¹ se ha dado desde 1986, con la construcción de un robot bípedo caminante muy rústico. Este fue el punto de partida para numerosas investigaciones en este campo, el cual tiene en el robot ASIMO² de la compañía HONDA, su más reciente logro. A partir de la construcción de este robot, numerosas Instituciones Educativas, Centros de Investigación, Laboratorios Tecnológicos, han construido su propio robot humanoide, en el cual su desarrollo implica la aplicación de numerosas herramientas de la ingeniería Mecatrónica como el diseño mecánico, diseño electrónico, programación de controladores, algoritmos inteligentes, etc.

A lo largo de los años se han desarrollado dos tipos de robots bípedos; motorizados y pasivos. En esta Tesis se ha desarrollado un robot bípedo motorizado con principios de movimiento que existen en una caminata pasiva.

La mayoría de de robots bípedos son motorizados, es decir que para lograr movimiento, es necesario la presencia de un actuador (motor DC, AC, Bruslees, etc.), esto facilita la aplicación de diversos modelos de control, tales como seguimiento de trayectorias por cinemática inversa; previamente generadas

¹Robot que dispone de dos piernas para poder desplazarse de manera estable

²Robot humanoide tecnológicamente mas avanzado, capaz de andar, correr, subir y bajar escaleras, e imitar muchos movimientos humanos

a partir de patrones de la caminata humana, [1]; así como también consideraciones ZMP³.

La caminata pasiva es una clase interesante en locomoción bípeda, pues estos no presentan actuadores, sensores, o sistemas de control. Estos tipos de robots son impulsados solamente por la gravedad, algunos usan un mecanismo complejo de balance que les permite lograr una caminata estable hasta en 3D, [2]. Este tipo de análisis fue desarrollado en los 90's y aún sirve de inspiración para muchos investigadores que buscan un control mas robusto y adaptable a las condiciones de entorno.

En esta tesis se usa tan solo conceptos básicos de este tipo de robots, tales como el impulso que necesitan los actuadores en tiempos de transición en que estos no pueden ser modelados. Se ha usado además, conceptos de mecanismos virtuales para enfrentar el problema de control, pues se cree que para lograr una caminata estable no es necesario de contar con una trayectoria deseada, como ocurre con los robots manipuladores. A continuación se menciona algunos de este tipo de robots.

1.1.1. Asimo

Después de una década y media en la investigación de robots humanoides, la compañía HONDA presento la primera versión del ahora famoso robot humanoide ASIMO en el año 2000. El diseño y sus capacidades aún son materia de investigación en los últimos años. Este robot es considerado como el mas avanzado robot humanoide jamás creado, demostrando ingeniería excepcional en su diseño y en sus capacidades, incluyendo areas de locomoción, control de estabilidad, y visión computacional. La última versión de ASIMO (ver Figura 1.1), que mide 130 cm, pesa 54 kg y cuenta con varias aplicaciones procedentes de la inteligencia artificial; identifica y coge objetos; no solo puede avanzar y retroceder, sino

³zero moment point



Figura 1.1: Robot Asimo (2010) de la compañía Honda, cuenta con 34 grados de libertad, velocidad de desplazamiento de 2.7 km/h

que también se desplaza lateralmente. ASIMO es el robot que mejor imita los movimientos de los seres humanos; estos son determinados por el control de la reacción del piso y el control del ZMP (zero moment point) que permite al robot mantener una postura adecuada.

El objetivo de Honda es crear un robot humanoide capaz de interactuar y ayudar a personas que carecen de una plena movilidad, haciéndoles la vida más confortable; algunas empresas de Japón ya utilizan los servicios de ASIMO para funciones promocionales como la recepción de visitantes.

1.1.2. Bart robot

Robot Bípedo planar desarrollado por la universidad Alemana de Hannover y presentado en el año 2003 (ver Figura 1.2), capaz de caminar de forma lenta y estable con la ayuda de un soporte en la parte superior del robot, mide 1.25 m y pesa 35 kg, posee seis grados de libertad, tres en cada pierna; utiliza actuadores brushless DC con puntuaciones de 60 W a 150 W de potencia, conectados con reductores harmonic drive ⁴, pues es necesario contar con un alto torque en cada

⁴Tipo especial de engranaje con diseño compacto, ligero y un alto torque, muy usados en el campo de la robótica

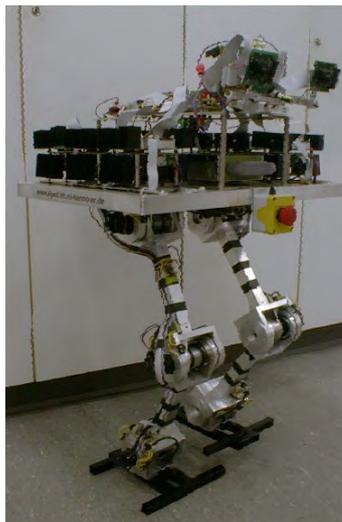


Figura 1.2: Robot Barth (2003) de Hannover University, con un movimiento planar logra una caminata lenta y estable.

una de las articulaciones; cuenta también con encoders ópticos⁵ en cada motor los cuales sensan posición angular; cuenta también con cuatro sensores de fuerza en cada pie; un sensor inercial ubicado en el torso.

Este robot posee un interesante diseño mecánico, por lo que fue tomado como inspiración para el desarrollo de esta tesis, además de contar con un hardware relativamente accesible, como son los DSP's, acelerómetros, etc.

1.1.3. Spring flamingo

Desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en el año 2000 (ver Figura 1.3), este robot tiene un actuador lineal en la cadera, rodilla, y tobillo por cada pierna; consta de un soporte lateral que reduce la caminata a un solo plano; todos los actuadores están conectados en la parte superior del cuerpo, estos transmiten potencia a las uniones vía actuadores elásticos⁶, [3]; los potenciómetros localizados en la cadera, rodilla, tobillo, y en el soporte miden los ángulos de unión

⁵determina posición contando el número de impulsos que se generan cuando un rayo de luz es atravesado por marcas opacas en la superficie de un disco unido al eje.

⁶cable elástico ubicado a la salida del reductor, a diferencia de sistemas tradicionales, estos reducen los efectos de inercia y fricción.

y el cabeceo del cuerpo.



Figura 1.3: Spring Flamingo (2000), MIT. Utiliza actuadores elásticos

Este robot utiliza técnicas de control de modelo virtual, [4], que a diferencia de los controladores mas usados en este tipo de robots, presenta gran ventaja por su robustez y simplicidad de afrontar el problema de la caminata bípeda, además usa técnicas de control de fuerza en los actuadores elásticos, [5], para la retroalimentación de esta fuerza usa potenciómetros lineales para medir la compresión en los resortes localizados en cada uno de los actuadores, el robot camina a 0.75 m/s, el máximo torque que puede ser aplicado a la cadera y al tobillo es 16 Nm, mientras que a la rodilla un torque máximo de 24 Nm. El robot tiene un alto margen de estabilidad y es robusto a pequeñas perturbaciones, pesa aproximadamente 13.5 kg y mide 90cm de altura.

1.1.4. Rabbit robot

Desarrollado en conjunto por el Instituto Nacional de Investigación en Automática e Inteligencia Artificial, INRIA, El Centro Nacional de la Investigación



Figura 1.4: Rabbit Robot (2004), GIPSA-lab, CNRS

científica, CNRS⁷, y el GIPSA-lab⁸ en el año 2007 (ver Figura1.4). Este robot mide 1.425 m y pesa 36 kg, el mecanismo tiene pocos grados de libertad (cinco o siete dependiendo de la fase de movimiento), capaz de soportar impactos asociados a las transiciones de fase. Cuenta también con un soporte horizontal en la parte superior del cuerpo, que permite al robot lograr una caminata planar, además de ruedas transversales en los pies para compensar a la fuerza de rozamiento que se genera en cada paso.

Contribuye a esta tesis en el modelado y control de sistemas no lineales, sistemas híbridos aplicados a la locomoción bípeda, [6], para el control se hacen uso de modelos dinámicos para cada fase de la caminata bípeda; fase de apoyo (uno o dos pies están en contacto con el piso), o fase de vuelo (no existe contacto con el piso), cada fase de transición es caracterizada por un impacto de uno o dos pies con el piso, necesitando un modelo inicial, que determina la condición inicial

⁷Organización de investigación financiada por el gobierno, bajo la autoridad administrativa del ministerio de investigación de Francia.

⁸Laboratorio multidisciplinar de Francia, destaca internacionalmente por su investigación en imágenes automáticas, señal del habla y cognición.

del subsiguiente modelo.

1.1.5. Andy ruina's lab

Construido por el grupo Ruina de la Universidad de Cornell, El robot bípedo McGeer, [7] usa ideas mecánicas para estudiar el movimiento humano, la locomoción bípeda en particular, hace uso de elementos pasivos en el mecanismo que permiten una caminata lenta y estable sobre una superficie inclinada, sin actuadores, sensores, o control. Este robot se compone de una pierna que estará en oscilación (sin el contacto con el suelo) y de otra que mantendrá una postura constante (esta rodará sin deslizarse sobre el suelo), ambas piernas unidas por la cadera con una bisagra sin fricción, además de una masa extra, que simulará el cuerpo superior del robot, esta masa es adherida en la parte superior de la cadera. Las dos piernas son idénticas, cada una está compuesta de un muslo rígido y un vástago, la rodilla es una articulación de giro sin fricción; estas intercambian funciones cuando una de ellas choca contra el suelo.

Otro robot interesante construido por el Lab Ruina de Cornell University, es el pasivo 3D que es conceptualmente similar al McGeer, con más grados de libertad y un nuevo diseño que fueron desarrollados a través de visión física, experimentación y lecciones aprendidas del McGeer, de tal manera que este se mantenga estable en tres dimensiones como se muestra a la derecha de la Figura 1.5.

1.2. Motivación de la investigación

Existe un interés intrínseco en crear robots que tratan de imitar el rango de movimiento y el aspecto físico de los humanos, por alguna razón práctica o psicológica, tenemos la necesidad de crear robots en nuestra propia imagen. Un gran número de robots han sido creados a partir de esta motivación, la gran

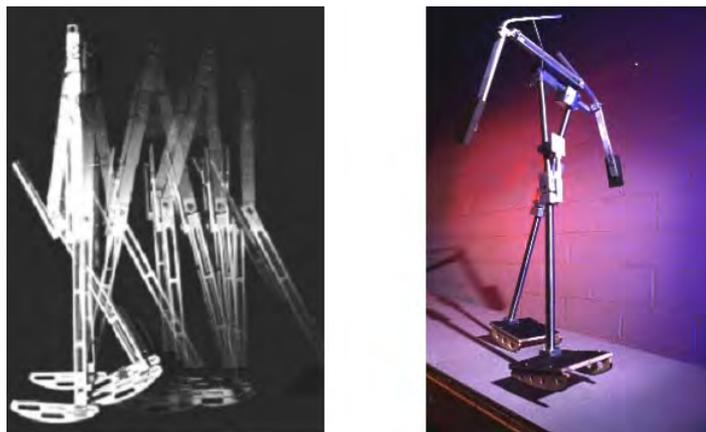


Figura 1.5: A la izquierda McGeer caminando sobre una rampa no visible de poca profundidad, a la derecha bípedo pasivo 3D en el cual los brazos oscilantes están unidas rígidamente a las patas opuestas. ambos desarrollados por el laboratorio de biorrobótica y locomoción - Cornell University

mayoría en Japón, Otra justificación común para robots bípedos es que a pesar de las enormes ventajas que nos ofrecen los convencionales robots sobre ruedas, la locomoción con patas nos permite una mayor flexibilidad en terrenos difíciles.

Otra motivación en el estudio de mecanismos caminantes es poder aprender mas acerca de la caminata humana, existen muchas aplicaciones para crear y validar modelos de caminata humana, para una posterior aplicación directa en áreas que incluyen: la evaluación de los efectos de una serie de patologías en pacientes con accidentes cerebrovascular, parálisis cerebral, movilidad asistida por exoesqueleto, [8] (ver Figura 1.6) , etc.

Otra motivación adicional es crear máquinas autónomas capáz de interactuar con los seres humanos y su entorno. Para lo cual estos robots necesitan responder a una variedad de disturbios que se encuentran en la naturaleza, esto hace que sean diferentes a los robots rígidos de fábrica.



Figura 1.6: Movilidad asistida por exoesqueleto, El exoesqueleto tiene tres y dos grados de libertad activos y pasivos por pierna respectivamente, Florida Institute for Human and Machine Cognition.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Lograr una caminata estable del robot prototipo en un plano transversal utilizando conceptos de modelamiento virtual y una adecuada estrategia de control.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar y validar el modelo virtual, realizando la simulación del sistema en software y probando su estabilidad.
- Simular e implementar una estrategia de control con tal de lograr una caminata estable.
- Implementar un robot prototipo que permita validar el resultado de la estrategia de control.

1.4. Alcances

El desarrollar el estudio de la caminata bípeda permite poder realizar aplicaciones futuras en robótica humanoide no solo enfocadas a robótica móvil o manipuladores sino también a nuevos campos emergentes tales como:

- Diseño de prótesis activas o pasivas.
- Evaluación de los efectos de patologías musculares (para pacientes con parálisis cerebral).
- Rehabilitación muscular efectiva.
- Animación más realista de características humanoides, para el uso en películas animadas, videojuegos y variedad de software interactivo.
- Dinámicamente apropiado para interactuar con humanos y su ambiente real.

1.5. Limitaciones

Al contar con un soporte transversal, el robot se limita a realizar una trayectoria circular, existiendo un pequeño rozamiento en el plano transversal del pie, afectando en menor medida al sistema. Además de las propias limitaciones que existen en la electrónica, como son la velocidad de procesamiento, filtración y transmisión de señales proveniente de los sensores. Así como también en la parte mecánica, pues este prototipo tiene deficiencias en el diseño, por falta de recursos en el mecanizado, accesibilidad a motores pequeños y de gran potencia, reductores harmonic drive, sensores de fuerza, encoders, y acelerómetro adecuado.

CAPÍTULO 2

MODELAMIENTO

Es evidente que la performance de un robot depende mucho del modelamiento, es decir, lo bien que el modelo representa al sistema del mundo real, esta es la razón por la cual se han desarrollado muchos modelos dinámicos para los robots bípedos, [9],[10],[11]. Estos modelos de caminata humana se han desarrollado a partir de modelos simples, tales como el modelo del péndulo invertido, y el modelo masa-resorte para sistemas relativamente complejos que incluyen un número alto de grados de libertad. El objetivo principal de estos modelos es predecir las fuerzas internas y externas durante un ciclo regular de caminata, sin embargo para un robot que será accionado a través de motores de rotación, el cálculo de fuerzas musculares internas no será necesario, pero sí los momentos que se producen en las articulaciones correspondientes.

Hay razones principales para el cálculo de los torques de unión; una de ellas es que es necesario conocer valores de momento y potencia máximos, esto para elegir los actuadores adecuados, además de predecir los torques necesarios para generar movimiento de la estructura robótica. Así como también para generar trayectorias nominales de control para una caminata compleja hecha sobre la base de un modelo de caminata establecido, [12].

Esta tesis se basa en el modelamiento de un sistema estático, pues es suficiente para que el robot pueda seguir una caminata estable; se trata de afrontar el problema del modelamiento de una forma más simple posible, para lo cual se

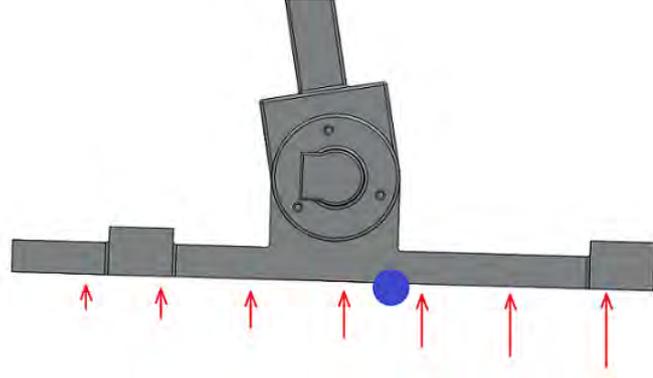


Figura 2.1: Ilustración del centro de presión (círculo azul), que es el punto sobre el cual se aplica la resultante de todas las presiones ejercidas sobre el pie.

analizaron varios modelos existentes, de manera que se pueda obtener un modelo por intuición, sin ahondar demasiado en ecuaciones matemáticas. En la siguiente sección se dará una descripción de conceptos generales para entender el modelamiento de este tipo de robots.

2.1. Centro de masa y centro de presión

El concepto de centro de masa y centro de presión ayudan a entender simples modelos de la caminata bípeda, tanto en una caminata planar como una en 3D.

El centro de masa es el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema.

$$\vec{P}_{cm} = \frac{\sum_i \vec{P}_{mi} m_i}{\sum_i m_i} \quad (2.1)$$

donde \vec{P}_{mi} es la locación de la masa i , y m_i es masa de la partícula i .

El centro de presión (ver Figura 2.1) es el punto en el que están concentradas todas las fuerzas debidas a presiones sobre un cuerpo, en este caso sobre el pie del robot.

$$\vec{P}_{cp} = \frac{\sum_i \vec{P}_{pi} p_i}{\sum_i p_i} \quad (2.2)$$

donde \vec{P}_{pi} es la locación de la presión sobre el suelo i , y p_i es el valor de esta presión.

Se observa también que la dinámica de la caminata bípeda es muy similar a la dinámica de un péndulo invertido; Esto si se compara el centro de masa del cuerpo con la masa del péndulo y el centro de presión en el pie con el punto de giro del péndulo.

2.2. Péndulo invertido

Existe una similitud entre la caminata humana y el péndulo invertido. El punto de giro localizado en el centro de presión en el pie y la masa del péndulo localizado en el centro de masa del robot. Por lo tanto, entendiendo la dinámica del péndulo invertido nos ayudará a entender la dinámica de la caminata.

En la Figura 2.2 se observa un péndulo invertido de longitud l con un punto de masa m , este se encuentra en un campo gravitatorio y tiene un pin de unión en la base. La masa corresponde a la masa del robot y el péndulo representa a la pierna. Éste es un modelo limitado para la caminata bípeda, pero se da una percepción cercana y es un concepto básico para modelos más detallados.

Por intuición física se conoce que el péndulo invertido tiene un punto de equilibrio en la posición superior y acelerará en cualquier dirección, cuanto más vertical es, más rápido va acelerar. Matemáticamente esto puede ser verificado derivando las ecuaciones de movimiento del péndulo, para ello se nota que no existe torque en el pivote de unión, la única cosa que afecta al momento angular del pivote es el torque debido a la gravedad. El momento angular en el pivote es:

$$H_0 = ml^2\dot{\theta}_1 \quad (2.3)$$

El cambio en el momento angular debido a la gravedad es:

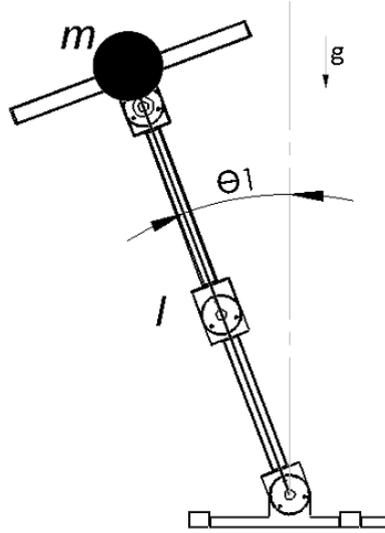


Figura 2.2: Modelo del robot bípodo con un solo soporte. m es la masa del cuerpo, l es la longitud de la pierna, y θ_1 es el ángulo de postura de la pierna

$$\dot{H}_0 = mgl \sin \theta_1 \quad (2.4)$$

Diferenciando H_0 y sustituyendo, obtenemos la ecuación de movimiento de un péndulo:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{g}{l} \sin \theta_1 \quad (2.5)$$

La intuición obtenida del modelo del péndulo invertido es la siguiente: suponiendo que la masa del robot se desplaza de izquierda a derecha y si la masa está en la parte izquierda del punto pivote, este se ralentizará a medida que suba, convirtiendo energía cinética a energía potencial gravitatoria. Si se encuentra en el lado derecho del punto pivote, este acelerará, convirtiendo energía potencial gravitatoria a energía cinética.

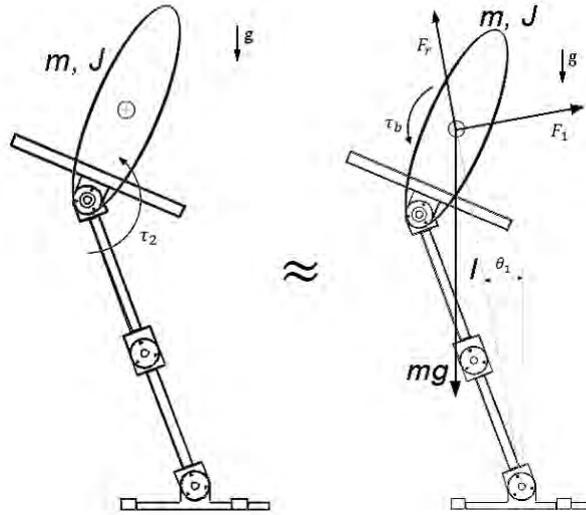


Figura 2.3: Modelo acrobot de un grado de libertad y un cuerpo inercial

2.3. Modelo acrobot

El modelo acrobot (ver Figura 2.3) es usado como un sistema de demostración para muchas técnicas de control por balance. En el presente caso el actuador de unión representa la articulación de la cintura o la rodilla que puede aplicar el torque τ_2 y la articulación inferior representa el punto de contacto del pie con el suelo, que no puede aplicar torque a la pierna.

Las ecuaciones de movimiento son, siempre y cuando el actuador de unión del acrobot esté doblado:

$$ml^2\ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - \tau_2 \quad (2.6)$$

$$m\ddot{l} = ml\dot{\theta}_1^2 - mg \cos \theta_1 + \frac{\tau_2}{R_{palanca}} \quad (2.7)$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_2 \quad (2.8)$$

donde $R_{palanca}$ es la distancia perpendicular desde la unión hasta la línea entre el centro de masa y el pivote en el suelo. En la parte derecha de la Figura 2.3

se muestra un diagrama equivalente de cuerpo libre del acrobot, con ecuaciones dinámicas:

$$ml^2\ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - lF_{\perp} \quad (2.9)$$

$$m\ddot{l} = ml\dot{\theta}_1^2 - mg \cos \theta_1 + F_r \quad (2.10)$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_b \quad (2.11)$$

donde:

$$F_{\perp} = \frac{\tau_2}{l}, \quad F_r = \frac{\tau_2}{R_{palanca}}, \quad \tau_b = \tau_2 \quad (2.12)$$

El parámetro τ_2 afecta a los tres grados de libertad del acrobot. En efecto, el acrobot es controlable cerca de la posición de equilibrio en que el centro de masa está por encima del pivote ($\theta_1 = 0^\circ$). Con el fin de afectar la dinámica rotacional del péndulo invertido, se debe aplicar un torque (τ_b) al cuerpo del robot; este torque efectivamente crea una fuerza perpendicular en el centro de masa (F_{perp}):

$$F_{\perp} = \frac{\tau_b}{l} \quad (2.13)$$

Esta relación es un resultado del pivote de unión que tiene un torque cero. De manera equivalente, todavía se tiene el caso en la que la gravedad afecta el momento angular alrededor del punto de pivote ($\dot{H} = mgl \sin \theta_1$), pero ahora el momento angular incluye el momento del cuerpo alrededor de su centro de masa, $J\ddot{\theta}_b$.

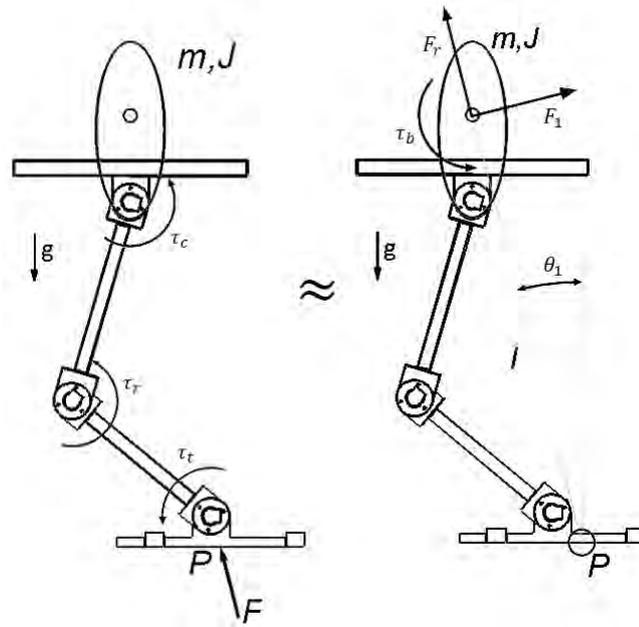


Figura 2.4: Modelo pierna bípodo sin masa (izquierda) y su equivalente diagrama de cuerpo libre (derecha). El robot bípodo tiene una masa m e inercia J . El punto P es la locación del centro de presión del pie.

2.4. Modelo bípodo sin masa

Ahora se puede examinar el modelo bípodo completamente, aunque simplificado. En la parte derecha La Figura 2.4 se muestra un modelo de un robot bípodo caminante en un solo soporte sin masa y sin oscilación de las piernas; toda la masa del robot esta localizada en la parte superior de la cadera. En la parte derecha de la Figura 2.4 se muestra el diagrama de cuerpo libre con las fuerzas equivalentes y torques de inercia en el cuerpo.

Las ecuaciones de movimiento del robot bípodo son:

$$ml^2\ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - lF_{\perp} \quad (2.14)$$

$$m\ddot{l} = ml\dot{\theta}_1^2 - mg \cos \theta_1 + F_r \quad (2.15)$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_b \quad (2.16)$$

donde:

$$F_{\perp} = f_1(\tau_a, \tau_k, \tau_h, \theta_a, \theta_k, \theta_h), \quad F_r = f_2(\tau_a, \tau_k, \tau_h, \theta_a, \theta_k, \theta_h), \quad \tau_b = f_3(\tau_a, \tau_k, \tau_h, \theta_a, \theta_k, \theta_h) \quad (2.17)$$

Donde f_1 , f_2 , f_3 , son asignaciones no lineales de los torques de unión entre el centro de presión y el centro de masa. Estas asignaciones son funciones complicadas, pero por ahora estas han de ser ignoradas, lo importante son las limitaciones en τ_b y F_{\perp} . De discusiones previas, se vio que F_r puede ser controlado arbitrariamente, pero el τ_b y F_{\perp} están relacionados por:

$$F_{\perp} = \frac{\tau_b}{l} \quad (2.18)$$

De manera que el torque total en el centro de presión (punto P) es cero. Por lo tanto, si hay un torque en el cuerpo, τ_b , entonces también habrá una fuerza inducida F_{\perp} perpendicular a la línea del centro de presión al centro de masa. Entonces se puede reescribir la ecuación como:

$$ml^2\ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - J\ddot{\theta}_b \quad (2.19)$$

Examinando esta ecuación, se nota que existen tres formas de poder modificar la dinámica rotacional del robot bípedo alrededor de su centro de presión. El primero y más efectivo es cambiar la locación del centro de presión, P, por lo tanto redefiniendo directamente el ángulo θ_1 . Al mover el centro de presión, se puede controlar la velocidad de avance, pero sólo en la medida que el centro de presión se mantenga en el interior del pie. El segundo método consiste en acelerar rotacionalmente la inercia del cuerpo (cabeceo hacia delante o hacia detrás). La

tercera y menos eficaz es tirar o empujar la masa (cambiar l).

En una caminata normal, el cuerpo del robot no tiene una experiencia significativa rotacional ($\ddot{\theta}_b \approx 0$), y $F_{\perp} \approx 0$. Adicionalmente, la longitud de la pierna se mantiene completamente constante ($\dot{l} \approx 0$). Por lo tanto, la dinámica rotacional del robot alrededor del centro de presión es gobernado por la ecuación del péndulo $\ddot{\theta}_1 = \frac{g}{l} \sin \theta_1$. Por lo tanto, la forma más eficaz para controlar la velocidad de avance del robot bípedo durante un único soporte es cambiando el punto de rotación efectiva de la dinámica del péndulo, es decir moviendo la ubicación del centro de presión (punto P).

2.5. Modelo virtual

El modelo virtual es un lenguaje para describir los comportamientos interactivos de fuerza; utiliza simulaciones de componentes mecánicos imaginarios para generar fuerzas que se aplican a través de torques, creando la ilusión de que los componentes simulados están conectados al robot real, [13].

Una de las razones de porque se está desarrollando esta técnica, es a que este modelo es compacto, requiere poco procesamiento, y puede ser implementado de manera distribuida, esto debido al hecho de que no existen matrices inversas o enlaces en serie.

Para simular estos componentes virtuales es necesario la definición de los marcos de referencia; cálculo de la cinemática directa; cálculo de la matriz jacobiano; y cálculo de los torques de unión. A continuación se define cada uno de los marcos de referencia necesarios para cada componente virtual, estos son:

- Marco de Acción $\{B\}$
- Marco de Reacción $\{A\}$
- Marco de Referencia $\{O\}$

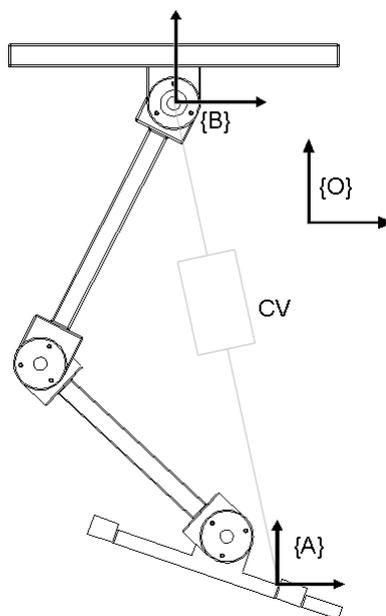


Figura 2.5: Componente virtual. $\{B\}$ es el marco de acción. $\{A\}$ es el marco de reacción. $\{O\}$ es el marco de referencia. CV representa el componente virtual, este es dibujado esquemáticamente para mostrar como actúa entre los marcos $\{A\}$ y $\{B\}$.

Este marco de referencia se aplicará para el caso del robot bípedo, considerando un solo soporte (ver Figura 2.5). El marco de acción define la conexión del componente virtual en el cual actúa una fuerza generalizada. El marco de reacción define el segundo punto de acción del componente virtual. El marco de referencia es el sistema de coordenada en el cual son expresados todos los desplazamientos, fuerzas, etc.

Los marcos de acción, reacción, y referencia necesitan ser no inerciales, no cartesianas, y no necesitan ser directamente atacadas en partes físicas del robot; sin embargo, en la mayoría de los casos, los tres marcos pueden ser cartesianos, estos se conectarán a puntos lógicos del robot como uniones, enlaces, o efectores finales, incluso el marco de referencia puede coincidir con $\{A\}$ o $\{B\}$. Es decir estos serán conectados donde ellos se hagan más intuitivos.

En el caso del robot bípedo, no es necesario especificar el marco de referencia. Lo único necesario es la rotación relativa entre el marco de referencia y los marcos

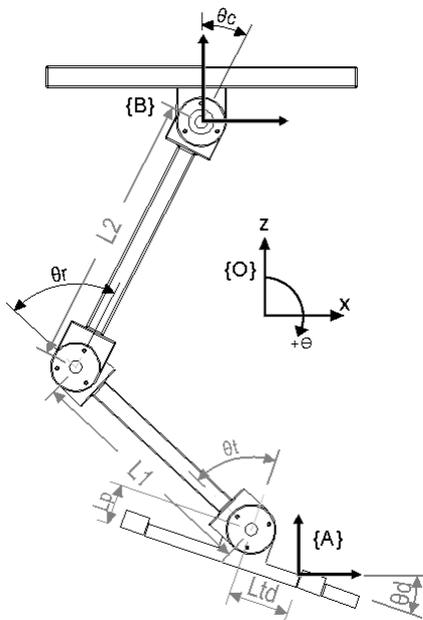


Figura 2.6: Modelo Virtual de una sola pierna. El marco de reacción $\{A\}$ tiene la misma orientación del marco de referencia $\{O\}$ de manera que ${}^O_A R = I$.

de acción y reacción, estos marcos deben ser definidos de manera que no haya rotación relativa entre ellos en ninguna orientación del robot, pues esto hace imposible producir torques relativos entre los dos. La mejor manera de determinar cómo fijar los marcos virtuales es por intuición física, y experiencia.

En esta sección se presenta la matemática necesaria para implementar los marcos virtuales en el robot bípedo, se comienza con el caso de un solo soporte, pasando luego por el de doble soporte.

2.5.1. Modelo virtual de una pierna

En la Figura 2.6 se muestra el modelo del robot bípedo con una sola pierna, notar que la unión en la punta del pie, punto $\{A\}$, no existe en el robot real, esto es usado para representar un punto en el pie donde no se aplica ningún torque, se refiere a esto como el “punto pie virtual” que es similar al centro de presión en el pie o el zero moment point, [14], excepto que esto denota cantidad y no una medida; además está basado en estática sin consideraciones dinámicas.

El punto pie virtual puede ser usado para el control del robot en un sentido intuitivo, es decir si es necesario reducir la aceleración, se puede mover el punto pie virtual cerca a la punta del pie. Si es necesario desacelerar, se debe mover el punto pie virtual hacia detrás del pie.

Al Conectar un componente virtual entre el punto pie virtual, $\{A\}$, y la estructura del cuerpo, $\{B\}$. θ_c , θ_r , θ_t , y θ_d , son los ángulos virtuales de la cadera, rodilla, tobillo, y dedo del pie. La barra superior (fémur) es de Longitud L_2 , la barra inferior (tibia) es de longitud L_1 , y la altura del pie es L_p . Asumimos que la punta del pie está en el suelo, de manera que ${}^O_R = I$. La distancia del tobillo al punto pie virtual es L_{td} .

La cinemática directa del marco $\{A\}$ al marco $\{B\}$ es el siguiente:

$${}^A_B \vec{X} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{td}\cos(\theta_d) - L_p\sin(\theta_d) - L_1\sin(\theta_d + \theta_t) - L_2\sin(\theta_d + \theta_t + \theta_r) \\ -L_{td}\sin(\theta_d) + L_p\cos(\theta_d) + L_1\cos(\theta_d + \theta_t) + L_2\cos(\theta_d + \theta_t + \theta_r) \\ -\theta_c - \theta_r - \theta_t - \theta_d \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Donde la diferenciación parcial con respecto a los ángulos de unión produce el Jacobiano:

$${}^A_B J = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & J_{1,3} & 0 \\ J_{2,1} & J_{2,2} & J_{2,3} & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Donde por cambio de variables:

$$J_{1,3} = -L_2\cos(\theta_d + \theta_t + \theta_r)$$

$$J_{1,2} = -L_2\cos(\theta_d + \theta_t + \theta_r) - L_1\cos(\theta_d + \theta_t)$$

$$J_{1,1} = -L_2 \cos(\theta_d + \theta_t + \theta_r) - L_1 \cos(\theta_d + \theta_t) + L_{td} \sin(\theta_d) - L_p \cos(\theta_d)$$

$$J_{2,3} = -L_2 \sin(\theta_d + \theta_t + \theta_r)$$

$$J_{2,2} = -L_2 \sin(\theta_d + \theta_t + \theta_r) - L_1 \sin(\theta_d + \theta_t)$$

$$J_{2,1} = -L_2 \sin(\theta_d + \theta_t + \theta_r) - L_1 \sin(\theta_d + \theta_t) - L_{td} \cos(\theta_d) - L_p \sin(\theta_d)$$

El Jacobiano relaciona la velocidad virtual entre marcos A y B con las velocidades de unión:

$${}^A_B \vec{X} = {}^A_B J \vec{\theta} \quad (2.22)$$

Y la fuerza virtual con el torque de unión:

$$\vec{\tau} = ({}^A_B J)^T ({}^A_B \vec{F}) \quad (2.23)$$

donde $\vec{\tau}$ es el vector torque de unión y \vec{F} es el vector de la fuerza virtual.

Considerando $\tau_d = 0$, ya que no se desea un actuador en el punto pie virtual, la ecuación es:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \tau_t \\ \tau_r \\ \tau_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{2,1} & -1 \\ J_{1,2} & J_{2,2} & -1 \\ J_{1,3} & J_{2,3} & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_z \\ f_\theta \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La velocidad del robot en el eje horizontal puede ser controlada indirectamente por la variación de la ubicación del centro de presión o por la longitud de paso, por lo que se es más concertado en aplicar fuerzas en la dirección vertical y

torques en el cuerpo, que en aplicar fuerzas horizontales, por lo cual se resuelve f_x en función de f_z y f_θ , tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f_x = \begin{bmatrix} \frac{-J_{2,1}}{J_{1,1}} & \frac{1}{J_{1,1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_z \\ f_\theta \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

reemplazando la ecuación 2.25 dentro de la ecuación 2.24 se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \tau_t \\ \tau_r \\ \tau_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-J_{1,2}J_{2,1}}{J_{1,1}} + J_{2,2} & \frac{J_{1,2}}{J_{1,1}} - 1 \\ \frac{-J_{1,3}J_{2,1}}{J_{1,1}} + J_{2,3} & \frac{J_{1,3}}{J_{1,1}} - 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Se asume que la punta del pie está sobre la tierra y que se pueden medir todos los ángulos de las uniones, a excepción del ángulo del punto pie virtual con la tierra, pues éste no existe físicamente, es virtual; para medirlo se se coloca un potenciómetro o un acelerómetro en el cuerpo del robot, luego se calcula en función de mediciones ya tomadas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\theta_d = -\theta - \theta_c - \theta_r - \theta_t \quad (2.27)$$

Ahora se tiene un simple grupo de ecuaciones para determinar los torques de unión dadas por las fuerzas virtuales. Estas ecuaciones serán usadas en la siguiente sección en el control de un robot bípedo durante una sola fase.

2.5.2. Modelo virtual para dos piernas

En la sección previa se discutió la implementación de un actuador virtual para un solo soporte. En esta sección se analiza el caso de doble soporte.

Se puede construir una matriz de restricciones y resolver exactamente para la distribución de fuerzas entre las dos piernas; sin embargo se ha decidido usar un método más simplificado pues:

- No hay solución cuando los pies están juntos, pues la matriz de restricción no es invertible en dicha configuración.
- Es poco probable que criaturas biológicas resuelvan el problema de la distribución de fuerza exactamente.
- Es innecesario resolver el problema de la distribución de fuerzas exactamente.
- El método desarrollado a continuación recurre más a la intuición.

En lugar de resolver el problema de distribución de fuerzas exactamente; simplemente se distribuye las fuerzas entre las dos piernas con un parámetro de distribución de fuerza α , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} f_z \\ f_\theta \end{bmatrix}_{left} = \alpha \begin{bmatrix} F_z \\ F_\theta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} f_z \\ f_\theta \end{bmatrix}_{right} = (1 - \alpha) \begin{bmatrix} F_z \\ F_\theta \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

donde:

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Como en el caso de un solo soporte, no se considerarán fuerzas en la dirección x pero sí en las direcciones z y θ .

Se escoge α de tal manera que las fuerzas se dividen entre las piernas en una forma natural. Si el cuerpo del robot esta encima de la pierna izquierda, todas la fuerzas son proporcionados por la pierna izquierda ($\alpha = 1$), de manera similar, si el cuerpo del robot está sobre la pierna derecha, todas las fuerzas serán proporcionados por la pierna derecha ($\alpha = 0$) Si el cuerpo del robot está entre la pierna izquierda y derecha, las fuerzas serán divididas con la siguiente relación lineal:

$$\alpha = \frac{x_{right}}{x_{left} + x_{right}} \quad (2.29)$$

donde $x_{left} \geq 0$ es la distancia horizontal de la pierna izquierda hasta el cuerpo y $x_{right} \geq 0$ es la distancia horizontal de la pierna derecha hacia el cuerpo. Si ambas piernas están juntas, es similar al caso de soporte único y se puede simplificar $\alpha = 0.5$, dividiendo las fuerzas de manera uniforme entre las dos piernas.

Se puede modificar el parámetro de distribución de fuerza α , es decir si se quiere acelerar hacia delante, se puede poner la fuerza de distribución en la parte trasera, para acelerar hacia atrás, se puede poner más de la fuerza de distribución en la pierna delantera. Por ejemplo se puede usar una simple ley de control $\alpha = \alpha_0 + b(\dot{x}_d - \dot{x})$ para ayudar a regular la velocidad cuando la pierna izquierda es la pierna trasera.

CAPÍTULO 3

ESTRATEGIA DE CONTROL

En esta tesis se considera que las trayectorias específicas, precisión, y repetibilidad no son relevantes en la caminata bípeda, pues el movimiento resultante puede variar considerablemente entre individuos, por lo tanto, se pueden usar sencillas estrategias de control, [15], a pesar de no obtener un óptimo seguimiento.

Se han desarrollado cinco condiciones básicas que se deben cumplir para lograr una caminata estable del robot bípedo planar, las cuales son; estabilización de la altura; estabilización del cabeceo; estabilización de la velocidad de desplazamiento; la oscilación de una pierna tiene que avanzar de manera que los pies se encuentren en lugares que permitan la estabilidad de la altura; y finalmente las transiciones de la pierna de apoyo deben ocurrir en tiempos apropiados. Si se logran estos cinco objetivos satisfactoriamente, el robot bípedo podrá caminar.

Para lograr estos objetivos, se pueden usar diferentes estrategias de control, cada estrategia puede ser implementada de forma diferente. A continuación se presentan algunas propiedades básicas que deben cumplir estas estrategias de control.

3.1. Propiedades del algoritmo de control

El algoritmo de control que se desarrolla en este capítulo, tiene las siguientes características

- **Simple** Las leyes de control empleadas son de orden lineal, con términos simples.
- **Desacoplado** El problema de control es descompuesto en subproblemas de altura, cabeceo, velocidad, para los cuales se desarrollan controladores independientes.
- **Referencia física** Los parámetros de las leyes de control son halladas físicamente, usando intuición física.
- **Baja impedancia** El controlador usa técnicas de baja precisión y mantiene bajos los parámetros del control de ganancia, esto permite que el robot se enfrente a un disturbio o terreno desconocido.

El problema de funcionamiento del robot fue descompuesta en tres partes: altura, balance y velocidad, y las reglas de control fueron desarrolladas para cada parte usando intuición física, estas reglas se pueden describir en términos sencillos: para controlar la altura, se energiza el resorte que representa la pierna cuando esta esté totalmente comprimida; para controlar el balance, el cuerpo presenta servomotores, y se usa un torque en la cadera para mantener el mismo nivel que el suelo cuando la pierna esta comprimida; para controlar la velocidad de un paso, el pie se coloca más hacia delante (para frenar) o más atrás (para acelerar) desde el punto neutro en que la velocidad no aumneto o disminuye.

Para la caminata bípeda se usa la misma descomposición añadiendo el control de balanceo de la pierna y la marcha de las transiciones de estados; sin embargo, la caminata es bastante diferente al problema de funcionamiento, por

lo cual, las estrategias y los resultados de las leyes de control serán diferentes de las leyes de control de funcionamiento.

Es posible usar técnicas de adaptación o aprendizaje para sintonizar automáticamente los parámetros de control, [16],[17] y cuando la adaptación o aprendizaje este completa, es posible entender lo que se aprendió.

En la siguiente sección se describen las estrategias de control basadas en intuición física que pueden ser usados para controlar la caminata del robot, estas estrategias son fáciles de entender y fáciles de aplicar; algunas han sido usadas exitosamente en el robot bípedo planar.

3.2. Estrategia de control

En esta sección se describe las estrategias de control que pueden ser utilizados para lograr las cinco condiciones requeridas para la caminata bípeda: estabilización de altura; estabilización de cabeceo; estabilización de velocidad; oscilación de pies; y transición de soportes.

Existen muchos métodos que pueden ser usados para implementar las estrategias de control. Esto incluye cinemática inversa, control por realimentación, control por impedancia, etc. En esta tesis se usa el método de control de un modelo virtual, esta técnica de control usa simulaciones de componentes mecánicos virtuales para generar un torque real. Estos torques de union crean el mismo efecto que pueden haber creado componentes virtuales, por lo tanto crean la ilusion de que los componentes simulados estan conectados en el robot real. Estos componentes pueden ser lineales o no lineales tales como resortes, amortiguadores, masas, o cualquier otro componente que produsca una fuerza o torque basada en este estado.

3.2.1. Estabilización de altura

Para estabilizar la altura es necesario que la menos un soporte este firmemente en el suelo, a continuación se describen dos estrategias para estabilizar la altura:.

1. Mantener una altura constante sobre el nivel del suelo.
2. Mantener una postura constante en las piernas.

Mantener una altura constante puede ser implementado con un mecanismo virtual resorte-amortiguador entre la tierra y el cuerpo del robot. El robot debe mantener un set point que determina la altura sobre el suelo.

Manteniendo una postura constante en las piernas puede ser elaborado de diferentes formas, un simple método que no requiere alta ganancia de realimentación es usando un contrapeso de una fuerza un poco mayor que el peso del robot.

3.2.2. Estabilización del cabeceo

La estabilización del cabeceo será sencilla, siempre y cuando al menos un soporte este firmemente en el suelo. Tenemos dos estrategias.

1. Mantener un nivel de cabeceo
2. Seguir una trayectoria de cabeceo

Ambas estrategias requieren realimentación desde el centro de gravedad que esta por encima de la cintura. Para controlar el cabeceo, se usa un mecanismo virtual torsional resorte-amortiguador. Si se desea un nivel de cabeceo, se tiene que mantener constante el set point del resorte virtual. Si se desea seguir una trayectoria, se tiene que cambiar el set point para coincidir con la posición de cabeceo deseado (ver Figura 3.1). En esta tesis se usa la estrategia de mantener un nivel de cabeceo.

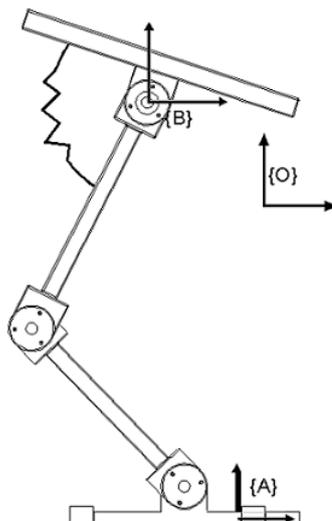


Figura 3.1: Estabilización del nivel de cabeceo de la cintura mediante un mecanismo virtual torsional resorte-amortiguador

3.2.3. Estabilización de velocidad

De acuerdo a la dinámica de la caminata bípeda, es imposible controlar arbitrariamente la velocidad de avance durante un paso, ya que durante la mayor parte del paso, la proyección del centro de masa se encuentra fuera del polígono del pie de apoyo; sin embargo, se puede modificar la velocidad bajo limitaciones y a partir de un paso a otro paso usando eventos de control discreto.

Tenemos cuatro estrategias para la estabilización de velocidad:

1. Cambiar la longitud del paso.
2. Cambiar los eventos de transición.
3. Variar la ubicación del centro de presión en el pie de apoyo.
4. Variar la distribución de fuerza durante el doble apoyo.

Las dos primeras estrategias (longitud de paso y transiciones) son controladores discretos que estabilizarán la velocidad sobre un número de pasos. Al cambiar la longitud de paso y eventos de transición, se puede cambiar la fracción de paso en

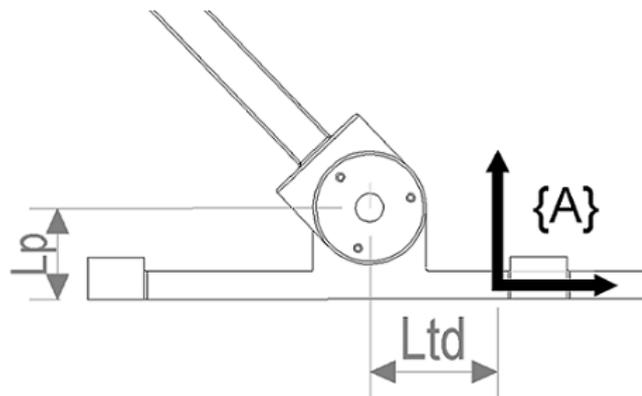


Figura 3.2: Variación de la ubicación del centro de presión en el pie de apoyo la que el pie de apoyo esta delante del cuerpo (ralentizando el robot) y la fracción de paso en el que el pie de apoyo esta detras del cuerpo (acelerando el robot)

La tercera estrategia (centro de presión) puede ser usado para controlar la velocidad durante el soporte único, el centro de presión puede ser colocado cerca a la parte delantera del pie, para retardar el robot, o más cerca a la parte del talón para acelerarlo. En esta tesis se utiliza el punto pie virtual suponiendo que este y el centro de presión estan altamente relacionados (ver Figura 3.2).

La cuarta estrategia (distribución de fuerza) sólo puede ser usado durante la fase de doble apoyo, se puede aplicar más fuerza por la pata trasera para acelerar el robot y más fuerza por la pata delantera para frenar el robot, esto cambia la ubicación efectiva del centro de presión de una pierna virtual entre las dos patas reales (ZMP).

3.2.4. Estabilización de balance

Para conseguir una caminata exitosa, la oscilación de una pierna debe girar rapidamente a la ubicación del apoyo siguiente, en nuestro caso, no es importante una ubicación exacta del robot cuando este camina en un suelo nivelado.

Se tienen dos posibles estrategias para la estabilización de balance:

1. Energizar la oscilación de la pierna, ya sea como una función de tiempo, o

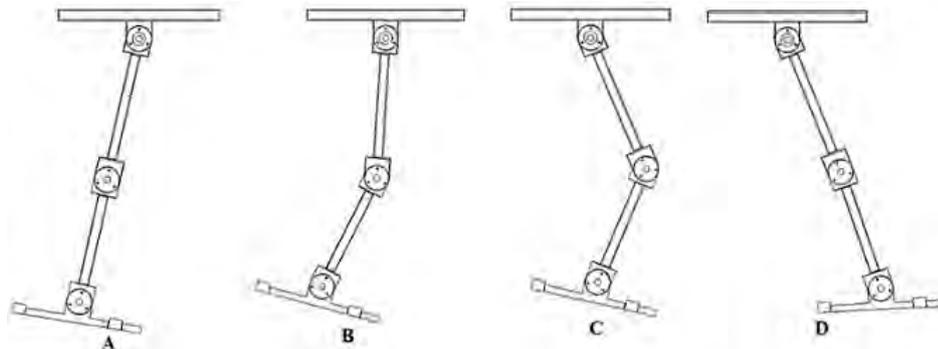


Figura 3.3: Oscilacion de una pierna, mientras la otra se encuentra como soporte como una función de estados del soporte de pierna.

2. Balancear la pierna pasivamente, asegurándose de que no caiga al suelo.

Para seguir una trayectoria de balance; se puede implementar un mecanismo virtual resorte-amortiguador colocado entre el cuerpo y el tobillo del robot (ver Figura 3.2). El set point del resorte puede moverse a lo largo de la trayectoria, arrastrando la pierna para seguirla.

En la segunda estrategia se aprovecha la dinámica del péndulo natural de oscilación de la pierna, esta se balanceará naturalmente hacia delante, mientras el pie despeja el suelo.

3.2.5. Transiciones de soporte

Para caminar hacia adelante, las piernas de apoyo deben alternarse, pues solo pueden apoyar el cuerpo por un pequeño rango de tiempo, es decir, la transición de doble soporte a un solo soporte y viceversa debe ocurrir en un tiempo apropiado.

Se tienen cuatro estrategias para lograr una transición adecuada de doble a un solo soporte, las cuales son:

1. Transición a un solo soporte si el cuerpo esta a una cierta distancia al soporte próximo.
2. Transición a un solo soporte si el cuerpo esta más de una cierta distancia

lejos del soporte anterior.

3. Transición a un solo soporte después de estar en doble soporte por un cierto tiempo
4. Transición a un solo soporte cuando la fuerza en la pata trasera cae por debajo de un umbral.

Estas estrategias se pueden implementar mediante la medición de ángulos en las articulaciones o por el cálculo de la cinemática del robot, se puede usar también una máquina de estados para realizar un seguimiento del estado actual del robot.

La primera estrategia asegura que el siguiente soporte tenga suficiente tiempo para que la otra pierna sea capaz de balancearse a tiempo. La segunda estrategia asegura que la pata trasera tenga suficiente rango de movimiento para que el robot no tenga que arrastrar su pata trasera. La tercera estrategia simplifica las transiciones a un solo soporte después de un tiempo determinado. La cuarta estrategia asegura que la pierna trasera no este soportando ninguna carga antes de girar.

En esta tesis, se utilizan las dos primeras estrategias en el control del robot bípedo, cuando cualquiera de los casos suceda, el robot hace la transición a un solo soporte

Se tienen dos estrategias para la transición de un solo soporte a doble soporte:

1. Transición a doble soporte si el cuerpo esta más de una cierta distancia lejos de un soporte.
2. Transición a doble soporte si la oscilación de la pierna se ha movido por demás de una cierta posición o se ha reducido por debajo de una cierta velocidad.

La primera estrategia asegura que el robot transicione sobre un nuevo soporte antes que el cuerpo se mueva demasiado lejos de la pierna actual. Esto garantizará que el soporte actual pueda soportar el cuerpo del robot y por lo tanto, estabilizar la altura y el cabeceo.

La segunda estrategia asegura que la pata de soporte próximo haya oscilado lo suficientemente lejos para que esté en una posición de sostener el cuerpo cuando llegue el momento.

3.3. Modelo virtual y control local

En esta sección se describe una diferencia entre los dos métodos de control; el modelo virtual que utiliza información de todas las uniones, tales como; medición de los ángulos en los actuadores, compresión en los actuadores lineales, etc, para producir un torque determinado. Este método se basa en el control por la interacción de fuerzas del robot con el medio que lo rodea, [18], es decir, el robot actuará dependiente de las fuerzas externas y de un mecanismo masa resorte amortiguador ubicado entre las uniones del robot, sin la necesidad de setear una determinada trayectoria, en contraste con el control local, donde, una vez que los ángulos deseados son determinados, cada articulación tratará de llegar a esa posición de forma independiente, a este proceso de cálculo se le conoce como cinemática inversa, que es un método muy utilizado en robótica, pues arroja buenos resultados en robots manipuladores ya que estos son programados para realizar una tarea determinada; sin embargo, tiene algunas desventajas como el cálculo de las mismas, pues su complejidad aumenta conforme aumentan los grados de libertad del mecanismo, como sucede en los robots humanoides, además de depender de una determinada trayectoria.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Debido a la gran dificultad para realizar un modelo mecánico del robot en forma inmediata, fue necesario buscar una herramienta que permita simular cuerpos en movimiento, y cualquier proceso en el que se involucre un exhaustivo análisis físico y matemático; una de las cuales son los programas de simulación, tales como: ODE, OpenGL, Matlab, etc.

La ventaja de los programas de simulación es que optimizan el análisis matemático y en muchos casos se pueden obtener importantes deducciones en forma eficaz y rápida, pero cabe destacar que para realizar una simulación que represente de buena forma a la realidad, se deben tener muy claros los conceptos de modelamiento, destacar además, que ningún software emulará en forma efectiva a un fenómeno físico.

La simulación del robot fue realizada en MATLAB mediante la herramienta SimMechanics, que permite simular cuerpos en movimiento extraídas del SolidWorks, sin tener que analizar ninguna ecuación diferencial, esto es una gran ventaja, ya que se puede observar en forma real el desempeño del robot y también la estética de la caminata.

Un aspecto fundamental por el cual se realizó esta simulación fue para determinar los torques máximos de cada actuador para el posterior dimensionamiento, limitando así el tamaño del robot.

Partes del cuerpo	Masa	Dimensiones
Cadera	11.445 kg	8.5 cm
Fémur	2.915 kg/pierna	44.5 cm
Tibia	2.735 Kg/pierna	38.5 cm
Pie	3.917 Kg/pierna	6.5 cm
Total	30.583 Kg	98 cm

Cuadro 4.1: Masas y dimensiones del modelo de simulación del robot en SolidWorks

4.1. Mecánica del robot

Para el diseño mecánico del robot bípedo se ha utilizado el software de SolidWork, que permite ciertas ventajas como; consideración de dimensiones (ver Tabla 4.1), densidad del material (aleación de Aluminio 1060), momentos de inercia de cada eslabón, centros de masa, etc, estos serán útiles en la simulaciones de Matlab, así se tendrán datos más cercanos al robot real para el posterior cálculo de torques, estas consideraciones son bastante similares al del robot bípedo Bart, [19], que tiene una analogía con la estructura típica promedio de un niño..

Se ha considerado también, el diseño de motores DC, encoders y Reductores, estos estarán ubicados en cada articulación (cadera, rodilla, tobillo) para cada pierna. En la Figura 4.1 se muestra el resultado del diseño mecánico del robot bípedo.

4.2. Interface simulink

Una vez realizado el diseño mecánico del robot, este se transferirá a la librería de Simulink¹, que es un entorno de programación visual que funciona en Matlab. En general viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de fenómenos físicos involucrados en los mismos, en el cual simmechanics es una librería especialmente centrada en robótica.

¹Es un entorno para simulación multidominio y diseño basado en modelos para sistemas dinámicos y embebidos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de librerías de bloques que le permiten diseñar, simular, implementar y probar una variedad de variables en el tiempo, incluidas las comunicaciones, controles, procesamiento de señales,etc

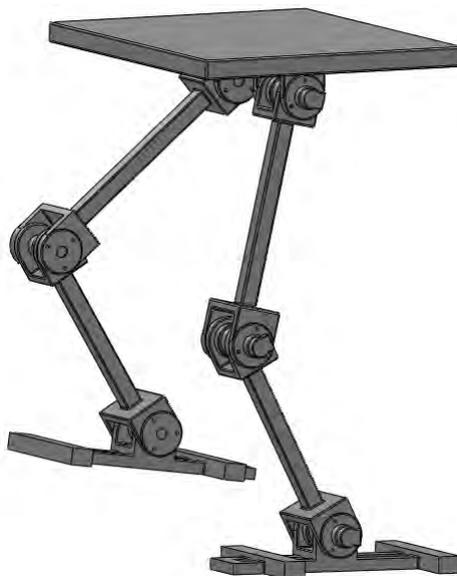


Figura 4.1: Diseño mecánico del robot bípedo en SolidWorks, se consideró dimensiones reales de los motores DC, reductores y encoders.

4.2.1. SimMechanics

Es una de las herramientas de simulink más usadas en robótica, [20], que permite simular sistemas mecánicos de forma fácil y eficiente, es decir, de cuerpos y articulaciones en movimiento, además de la monitorización y generación de movimientos. Lo más importante es que no requiere trabajar con ecuaciones diferenciales, ni la escritura de código de programación.

Esta herramienta desarrollada bajo el entorno de Simulink, permite crear diagramas de bloques que representen un determinado sistema mecánico, además de simular la acción de la gravedad sobre los cuerpos. SimMechanics posee cinco clases de bloques mostrado en la Figura 4.2.

- **Bodies** Los componentes fundamentales de un sistema son los cuerpos rígidos, los mismos que son definidos en SimMechanics como puntos u objetos en el espacio que tienen masa. Representa a un cuerpo rígido, mediante sus propiedades tales como su masa y momentos de inercia en cada uno de los ejes.

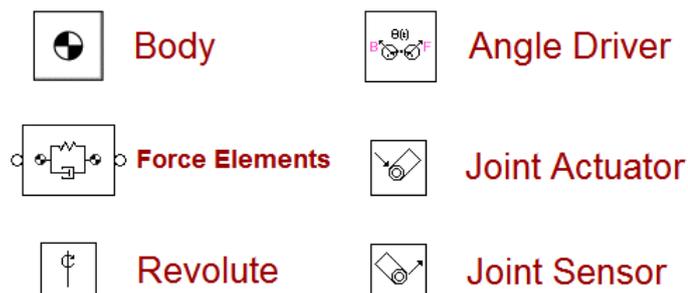


Figura 4.2: Componentes de la librería SimMechanics de Simulink

- **Joints** Las articulaciones en SimMechanics representan los grados de libertad que un cuerpo puede tener con respecto a otro, básicamente, existen dos tipos de grados de libertad: de traslación y de rotación, mediante estos dos simples grados de libertad podemos formar un gran número de articulaciones compuestas.
- **Constraints y Drives** Estos bloques limitan el movimiento entre dos cuerpos, mediante ciertas restricciones, las mismas que pueden ser de distancia, velocidad, ángulo, etc.
- **Sensors y actuators** Los sensores permiten monitorizar y medir principalmente el movimiento de un cuerpo o de una articulación, además, se pueden medir las fuerzas y torques. Los actuadores permiten “suministrar” fuerzas, torques o movimientos a los cuerpos y articulaciones. Tanto sensores como actuadores se pueden conectar a cuerpos, articulaciones, y limitadores.

4.2.2. Simulación del robot

Al importar el diseño de SolidWork, Simulink creará automáticamente las conexiones entre uniones y cuerpos, estos pueden ser modificados dependiendo del tipo de movimiento. En la Figura4.3 se muestra el diagrama de bloques de una de las uniones (cadera de la pierna derecha del robot), en el cual esta unión está

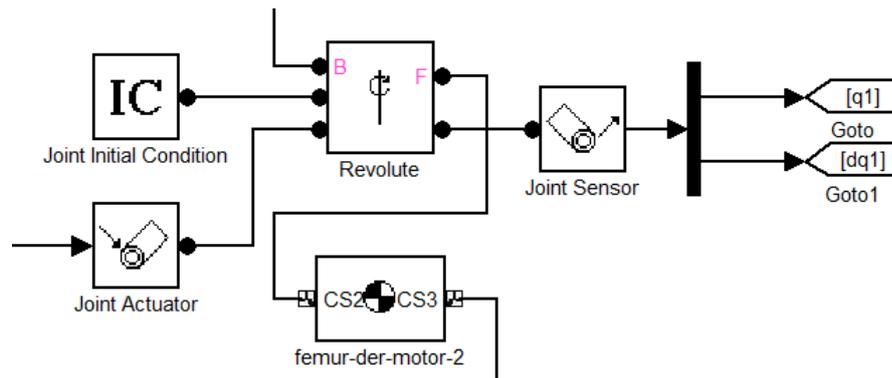


Figura 4.3: Simulación de una articulación, se considera: una condición inicial, señal PWM al actuador, sensor en el eje del motor, y la revolución que conecta la cadera con el fémur derecho.

conectada entre la cadera y el fémur derecho, a la vez está unida a una condición inicial; a un actuador que aplicará un torque, y a un sensor, que puede ser un encoder, del cual se puede obtener posición y velocidad.

Una vez configurado una unión, ahora se puede lograr la simulación de las seis uniones del robot (6 DOF), como se muestra en la Figura 4.4, con esta estructura se procederá a la simulación de la caminata bípeda. Cabe resaltar que fue necesaria la configuración de un piso común para cada pierna y así poder obtener una fuerza de reacción en la simulación para ambas piernas.

Con la configuración mostrada en la Figura 4.4 el robot podrá ser simulado siguiendo una trayectoria aleatoria que contradezca al peso del robot. En la Figura 4.5 se muestra la simulación del robot en el entorno de Matlab, donde se observa que se conservan propiedades mecánicas y dimensionales propias del diseño en SolidWork.

4.3. Estructura de control

Una vez obtenida la estructura del robot en simulink, se procede a simular el sistema de acuerdo al modelamiento y la estrategia de control virtual planteados en el capítulo 2 y 3; esta simulación será implementada en el entorno de simulink,

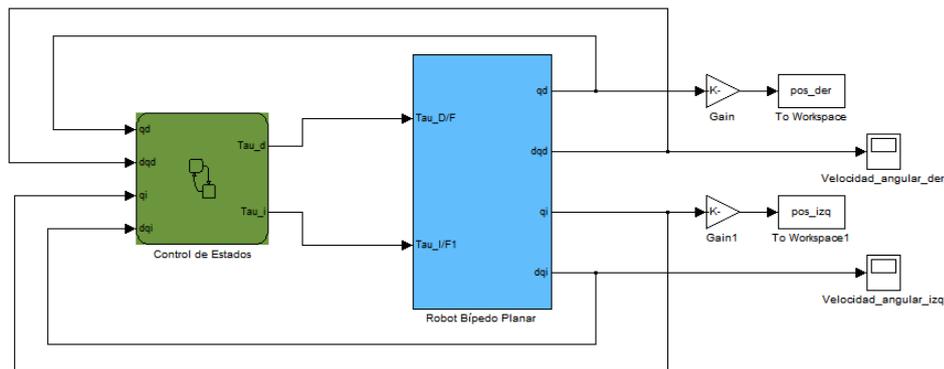


Figura 4.6: Esquema de control del robot bípido

para lo cual se plantea un esquema general de control del robot (ver Figura 4.6), el cual está compuesto por el bloque de control de estados y el modelo del robot; de esta forma se tiene una visión general de todo el sistema para su correcta simulación.

El bloque **Robot Bípido Planar** representa la planta a controlar; esta está compuesta por articulaciones, bloques de unión, etc. De la cual se sensa posición y velocidad angular para la retroalimentación del sistema.

El bloque de **Control de Estados** está compuesto por una secuencia de transiciones de fases que se ejecutan en un determinado tiempo y de forma independiente para cada pierna (ver Figura 4.7), este bloque de control envía un determinado torque a cada actuador del robot para lograr el movimiento del mecanismo y una adecuada caminata bípida.

Cada una de estas fases simula la ley de control planteada anteriormente, es decir, internamente se representa el modelo masa-resorte virtual, cuyas condiciones iniciales y ganancias varían para cada fase; el detalle de cada una de estas fases se muestra en el apéndice B2.

Cabe señalar que en el esquema de control del robot, se incluye la simulación del piso para cada pierna, esto se logra mediante la simulación de una fuerza de reacción entre el piso y el pie del robot, el cual es controlado por un simple controlador PID (ver apéndice B1).

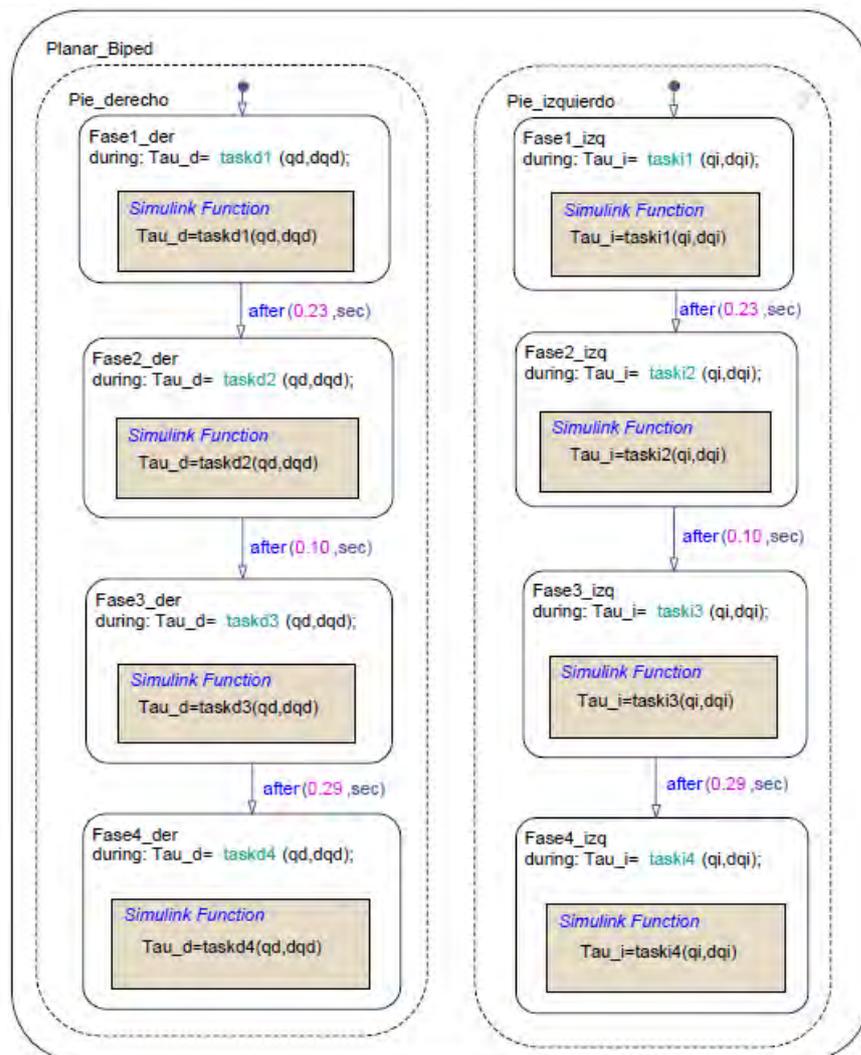


Figura 4.7: Bloque control de estados el cual denota la secuencia de fases para cada pierna de forma paralela

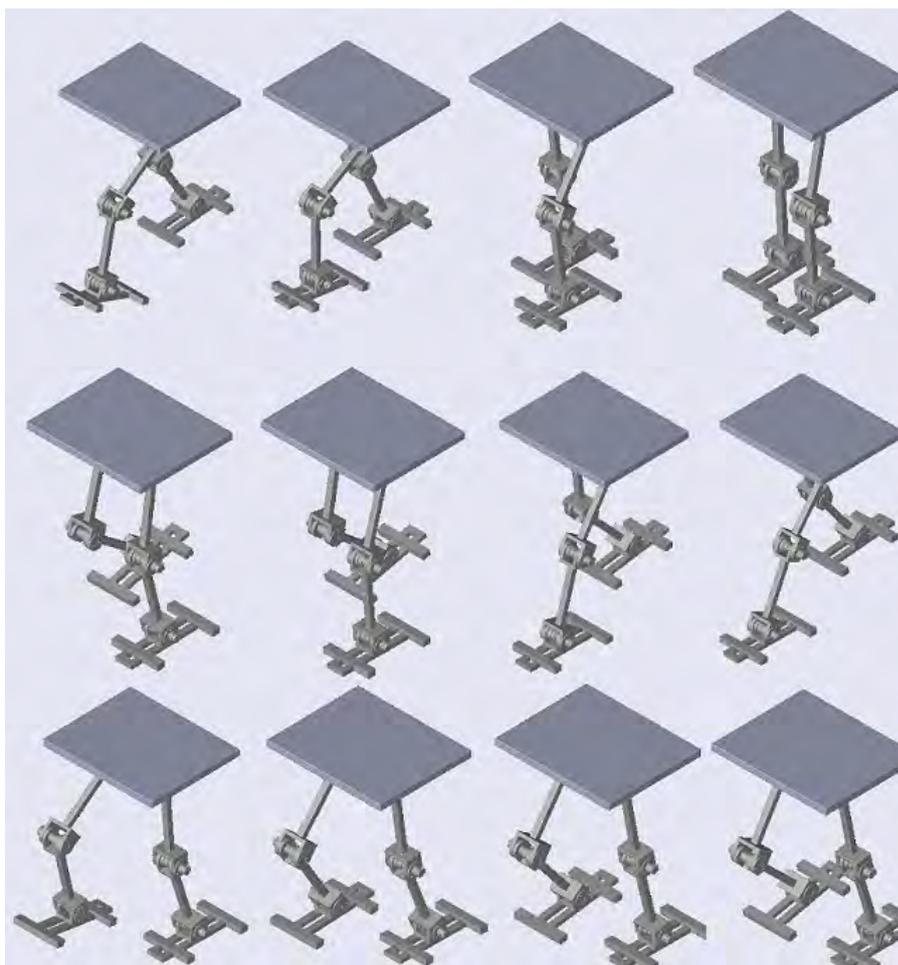


Figura 4.8: Resultado de la secuencia de simulación de la caminata bípeda obtenida desde el entorno de Simulink.

4.4. Resultados

Para lograr una caminata estable, fue necesaria la sintonización de cada una de las ganancias (constantes masa-amortiguador) para cada articulación, además del seteo de los tiempos de transición y adecuadas condiciones iniciales; el resultado de la simulación se muestra en la Figura 4.8, donde se observa una secuencia de caminata estable.

En la Figura 4.9 se muestra el ángulo generado por cada una de las articulaciones del pie derecho durante un ciclo de caminata.

En la Figura 4.10 se muestra el ángulo generado de cada una de las articulaciones del pie izquierdo en un ciclo de caminata.

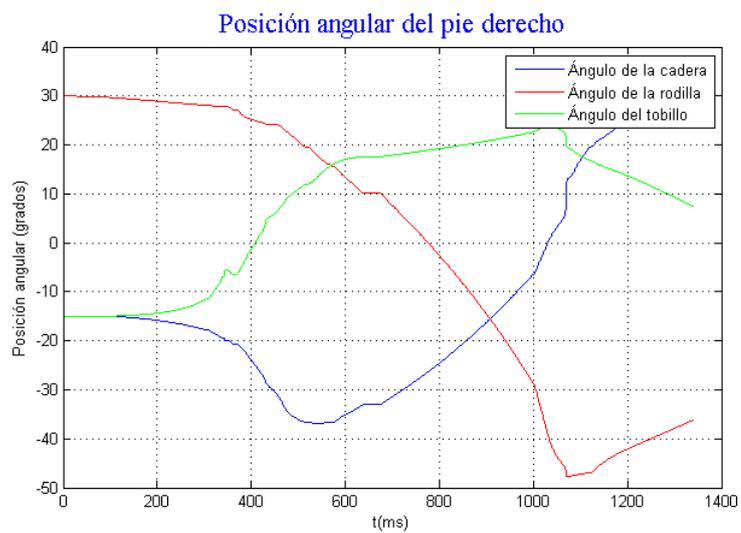


Figura 4.9: Variación angular de las uniones del pie derecho para un ciclo de caminata.

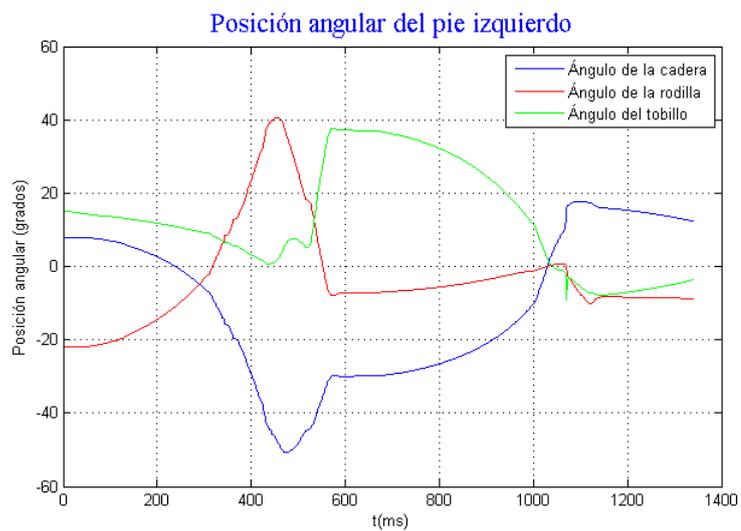


Figura 4.10: Variación angular de las uniones del pie izquierdo para un ciclo de caminata.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO RPY

Para la implementación física se ha desarrollado un robot prototipo al cual llamaremos RPY (ver Figura 5.1), la cual servirá para validar los resultados obtenidos de la simulación, cabe considerar que este prototipo difiere en gran medida del diseño de simulación, pues se encontraron limitaciones de costo, materiales adecuados, licencias de software, etc. Por lo que para la implementación se tomarón datos aproximados provenientes de la simulación.

5.1. Diseño del mecanismo para el RPY

El diseño del mecanismo del RPY se desarrollo en el software de SolidWork, teniendo en cuenta que se usará como material base, marco de aluminio AA-1060 de 1"x1"x1/8 para la estructura del robot. El software de diseño considera las medidas del robot en una manera más real, es decir, se toma en cuenta la dimensión del servomotor, diametro de los tornillos de unión, espesor del aluminio, etc. Además en los pies debe existir un pequeño desfase entre los apoyos laterales para evitar la posibilidad de contacto cuando ambos pies estén alineados para lograr cierto balance lateral. Se debe tener en cuenta también una plataforma en la cual se ubicará toda la circuitería necesaria. De esto dependerá en gran medida la forma final del robot para su posterior construcción, a continuación se muestran algunas dimensiones antes mencionadas de la estructura del RPY en la



Figura 5.1: Mecanismo RPY

Partes del robot	Masa	Dimensiones	Dimensiones
Fémur	42.39 gr		19.5 cm
Tibia	42.39 gr/pierna		18.0 cm
Pie	67.43 gr/pierna		4.5 cm
Plataforma superior	139.82 gr/pierna		6.0 cm
Total	444.23 gr/pierna		48.0 cm

Cuadro 5.1: Masas y dimensiones del prototipo RPY

Tabla 5.1.

Una vez recopilada toda la información acerca de los actuadores, sensores, dimensiones de los elementos mecánicos, grados de libertad y circuitos electrónicos, se procedió a diseñar en SolidWork cada una de las piezas mecánicas para su posterior ensamblaje, del cual el resultado final se muestra en la Figura 5.2.

5.1.1. Diseño del soporte

Debido a que el modelamiento del RPY se basa íntegramente en un análisis planar, Es necesario la construcción de un soporte que ayude al movimiento del



Figura 5.2: Diseño del mecanismo prototipo RPY en SolidWorks

robot para un correcto funcionamiento. Existen diferentes tipos de soporte; ya sea manteniendo fijo al robot de la cintura y dejar que este camine sobre una faja en movimiento sobre el piso, o también colocando un soporte transversal que este fijado de un lado de la cadera del robot, [21], este permitirá al robot moverse en una trayectoria circular, cuyos efectos de rozamiento en los pies propios del sistema serán despreciados.

En esta tesis se usa el segundo método, que es mas factible a construir, la cual se muestra en la Figura 5.3.

5.2. Sensores y actuadores

Es necesario el uso de sensores para lograr una realimentación adecuada, en el caso del RPY su usa un sensor potenciométrico. Los actuadores a usar seran servomotores de diferente torque, estos están ubicados en cada articulación y permiten un giro de gran precisión, y un alto torque en un reducido tamaño.



Figura 5.3: Mecanismo de soporte transversal, compuesto de dos rodamientos ubicados en las uniones, y dos pines que permiten mayor grado de movimiento

5.2.1. Sensor de posición y velocidad angular

Se usa un sensor potenciométrico que está ubicado dentro del servomotor, este mide un voltaje el cual se puede interpretar como el ángulo que recorre el servomotor, a partir de esta señal, se usa un circuito en el que se filtra esta señal para obtener posición y velocidad, estos datos servirán para dotar al sistema de las señales necesarias para el control del robot. Este sensor tiene un rango de operación de 3.3V, lo cual lo hace compatible con el DSP; sin embargo, por precaución no se va a conectar directamente al controlador, esta señal pasará por un circuito intermedio que amortigua los picos y ruidos que se obtiene al momento de medir, además que también limite la corriente de ingreso al controlador.

5.2.2. Sensor de inclinación

Este sensor mide la inclinación del soporte respecto a un plano horizontal, esta medición es en base a dos medidas, denominadas según la salida del sensor X_{out} e Y_{out} , que son las equivalentes al ángulo que ha girado según los ejes XY del plano y que están dadas por un ángulo de pulso, la señal de este sensor también pasará por el filtro mencionado anteriormente. en caso de usar acelerómetros ya no será necesario usar filtro alguno, pues estos ya vienen incorporados con uno

Carácterística	Valor
Dimensiones	40.7x19.7x42.9 mm
Peso	55g
Velocidad	0.2 s/60
Torque	10.0 Kg.cm(6V)
Ancho de zona muerta	10us
Temperatura de operación	0 55 C
Voltaje de operación	4.8 - 7.2 V

Cuadro 5.2: Características técnicas del servomotor Futaba

propio, salvo una conversión de tecnología TTL a CMOS, es decir regular el voltaje de 5V a 3.3 V.

5.2.3. Servomotor

Este servomotor viene acompañado internamente de un reductor y un controlador cuyas características técnicas se muestran en la tabla 5.2.

Un aspecto que habría que considerar, es el tiempo de respuesta de los dispositivos a emplear, el tiempo de activación mínima que requiere el servomotor es de 0.7 ms. por lo que el tiempo de respuesta de todos los dispositivos empleados deberá ser al menos de un décimo más rápido o sea 0.07 ms.

5.3. Interfaz electrónica

Se diseñó una interfaz electrónica propia para cada uno de los sensores, pues normalmente la señal sensada viene acompañada con ruido, esta interfaz filtrará y amplificará de ser necesario, además debe añadirse al circuito los drivers de potencia. Para la implementación de la estrategia de control se usó un módulo de microprocesador, que incluye como principal dispositivo al DSP.

5.3.1. Microprocesador

Se hizo uso del procesador digital de señales TMDSDOCK28335 Experimenter Kit, [22] de Texas Instruments (ver Figura 5.4), debido a su capacidad de

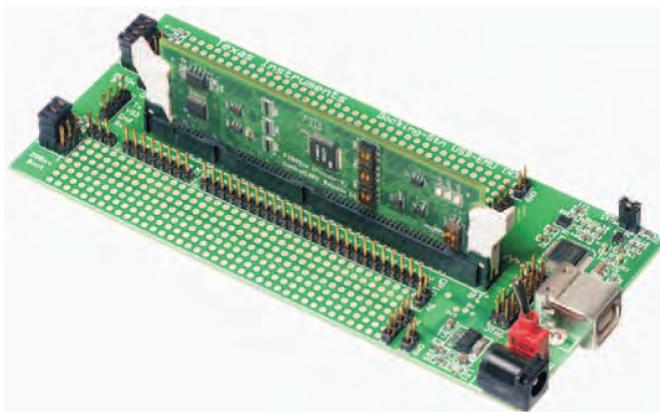


Figura 5.4: Kit Experimenter TMDSDOCK28335 de Texas Instruments

procesamiento y una respuesta rápida para los seis actuadores. Las características de este módulo se muestran en el Apéndice A.

Este procesador tiene la tarea principal de controlar todo el sistema (ver Figura 5.5), es decir, lee las señales provenientes de los potenciómetros, el cual es previamente acondicionado por un driver analógico; estas señales son procesadas de acuerdo a una ley de control, para después emitir señales PWM hacia los servomotores del robot, que también son acondicionadas por optocopladores para la protección del controlador; se debe tener en cuenta además que los servomotores son de 7V, 9V y 12V, por lo cual es necesario un driver de potencia que brinde estos voltajes, además de la alimentación del DSP con 3.3V y las tarjetas electrónicas con 5V.

Se usó además una conexión JTAG¹, que con la ayuda del emulador XDS100 de Spectrum Digital, permite emular el funcionamiento del sistema en tiempo real.

5.3.2. Driver de sensores

El esquema del filtro analógico se muestra en la Figura 5.6, donde se observa que la señal pasará por un seguidor de voltaje que estabilizará la corriente

¹Joint Test Action Group, Utilizado como mecanismo para depuración de aplicaciones empujadas, puesto que provee una puerta trasera hacia dentro del sistema, el cual permite al programador acceder al módulo de depuración y corregir sus errores de código.

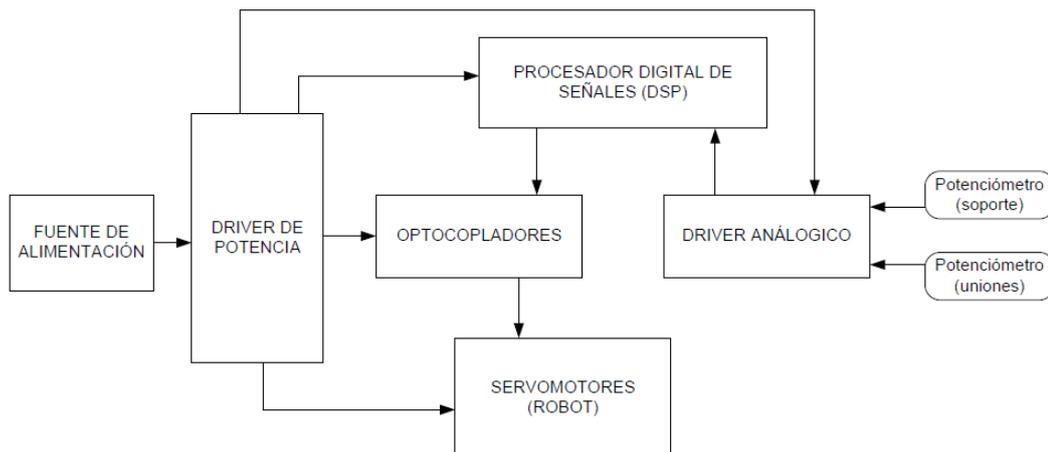


Figura 5.5: Esquema electrónico del RPY

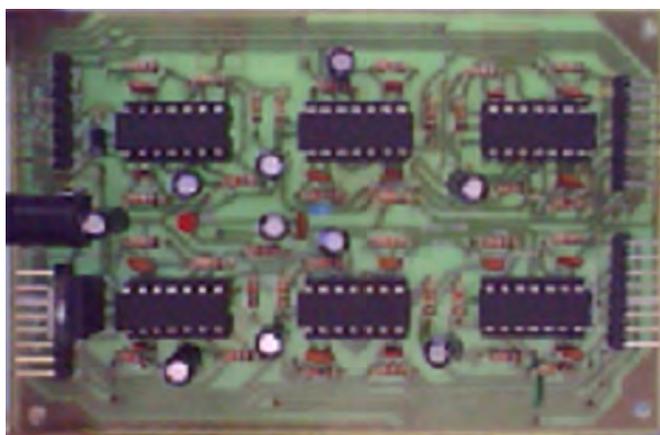


Figura 5.6: Filtro analógico

de ingreso, luego por un inversor para poder obtener la posición angular, y un derivador de donde se obtiene la velocidad angular de la unión.

El tiempo de respuesta del filtro es de $10 \times 10^{-6} \text{Fx } 10 \times 10^3 \times 5 = 0.5 \text{ s}$.

5.3.3. Driver de potencia

Esta compuesta de reguladores para los tres tipos de voltaje que necesita cada servomotor, con una alimentación general de 15V. este regulará voltajes de 12V , 9V, 7V, para los servomotores del tobillo, rodilla y cadera repectivamente (ver Figura 5.7). Cuenta también con optocopladores que protegerán la señal PWM de 3.3V proveniente del controlador con el de la señal necesaria para el



Figura 5.7: Driver de potencia

servo que es de 5V.

5.4. Estrategia de control aplicado al robot

El robot RPY tiene un servomotor en la cadera, rodilla, y tobillo por cada pierna. que es ayudado por un soporte transversal, reduciendo la caminata a un movimiento planar, Las tarjeta de interfaz electrónica de los sensores, drivers, y controlador estan ubicados en la parte superior de la cadera

5.4.1. Algoritmo de la Caminata

Las estrategias de control usadas para el RPY son:

- Mantener una postura constante de los pies, energizando el actuador de la rodilla.
- Mantener un nivel constante de cabeceo usando un mecanismo virtual resorte-amortiguador con un constante set point.
- La transición de doble soporte a un solo soporte cuando la posición hacia adelante del cuerpo se vuelve mas alla de una distancia pre-especificada de la pata trasera o una distancia menor de pre-especificada de la pata delantera.

- La transición de soporte único a doble soporte cuando la posición hacia delante del cuerpo se vuelva mas allá de una cierta distancia desde el pie de apoyo.
- Balancear la pierna de tal manera que el pie se coloque a una longitud de paso deseado desde el pie de apoyo.
- Aumentar la longitud del paso nominal para que el robot camine mas rápido.
- Retrasar la transición al doble soporte si el robot esta caminado lentamente. Por el contrario, iniciar la transición a doble soporte antes, si el robot esta caminando muy rápido.
- Mantener el centro de presión del pie de apoyo, aproximadamente debajo del centro de masa, moviendo esto hacia delante, si la caminata es demasiado rápida o hacia atras si la caminata es demasiado lenta.
- Durante el doble apoyo desplazar la carga hacia la pierna trasera si la caminata es lenta, o hacia la pierna delantera si la caminata es rápida.

Para implementar el algoritmo de la caminata del robot, se usa un simple conjunto de componentes virtuales y estados de máquina mostradas en la Figura 5.8.

Las diversas variables virtuales como resorte, amortiguador, y variables de fuerza y parámetros de caminata son escogidas usando intuición física y búsqueda manual. Por ejemplo, el control de cabeceo del resorte amortiguador es

$$\tau_b = K_{pitch} (\theta_d - \theta) - B_{pitch} \dot{\theta} \quad (5.1)$$

Donde τ_b es el torque en el cuerpo a través de la pierna de apoyo, θ es el ángulo de inclinación del cuerpo, θ_d es el set-point del resorte virtual, K_{pitch} es la rigidez del resorte virtual, y B_{pitch} es el parámetro del amortiguador virtual.

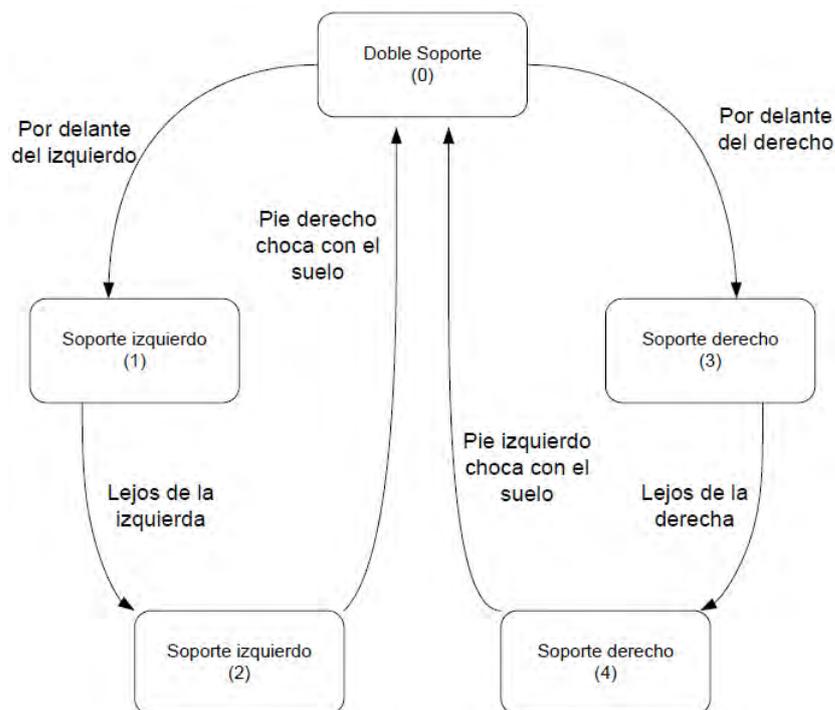


Figura 5.8: Estados de máquina usado para la caminata del RPY

Se sintoniza manualmente K_{pitch} y B_{pitch} hasta que el cuerpo del robot resista a girar y la velocidad de las oscilaciones se reduzcan de manera que sea aceptable.

Los parámetros del algoritmo de control están listados en la tabla 5.3, estos tendrán valores y rangos razonables, este rango representa la cantidad razonable de que el parámetro pueda variar, mientras que el robot se encuentra estable. Para algunos parámetros, el robot puede continuar caminando por todo este rango, para otros el robot no puede caminar si el parámetro se encuentra cerca de los límites del rango.

La fuerza vertical para controlar la altura es calculada para ser un poco más que el peso del robot. Muchos parámetros son sintonizados por examinación física de sus efectos (resistencia a ser empujado), hasta que los efectos deseados sean logrados y el robot camine exitosamente. Estos parámetros de caminata consisten en la longitud del paso nominal, distancias de transición, ganancias de oscilación de la pierna, y ganancias en la velocidad de las distancias de transición, longitud

Parámetros	Unidades
Control de Altura	
Gravedad virtual Z	N
Amortiguador virtual Z	N/(m/s)
Control de Cabeceo	
Resorte de cabeceo virtual	Nm/rad
Amortiguador de cabeceo virtual	Nm/(rad/s)
Control de velocidad de avance	
Velocidad nominal	m/s
Ganancia punto pie virtual	m/(m/s)
Ganancia doble soporte	%/(m/s)
Ganancia de transición de doble a un soporte	m/(m/s)
Ganancia de transición de uno a doble soporte	m/(m/s)
Control de balance	
Resorte virtual X	N/m
Amortiguador virtual X	N/(m/s)
Resorte virtual Z	N/m
Amortiguador virtual Z	N/(m/s)
Transiciones de soporte	
Distancia de transición pata trasera	m
Distancia de transición pata delantera	m
Distancia de transición de un soporte a doble soporte	m
Longitud de paso nominal	m

Cuadro 5.3: Parámetros de control del algoritmo de la caminata del RPY

de paso, punto pie virtual, y relación de carga en el doble soporte.

El bípido RPY es inicializado balanceando con los pies juntos, este empieza a caminar levantando una pierna y la transición hacia el periodo de apoyo único, no se requiere una intervención externa; este se detiene mediante el establecimiento de su velocidad deseada a cero. La implementación de este algoritmo de control del prototipo

RPY se muestra en el apéndice C.2

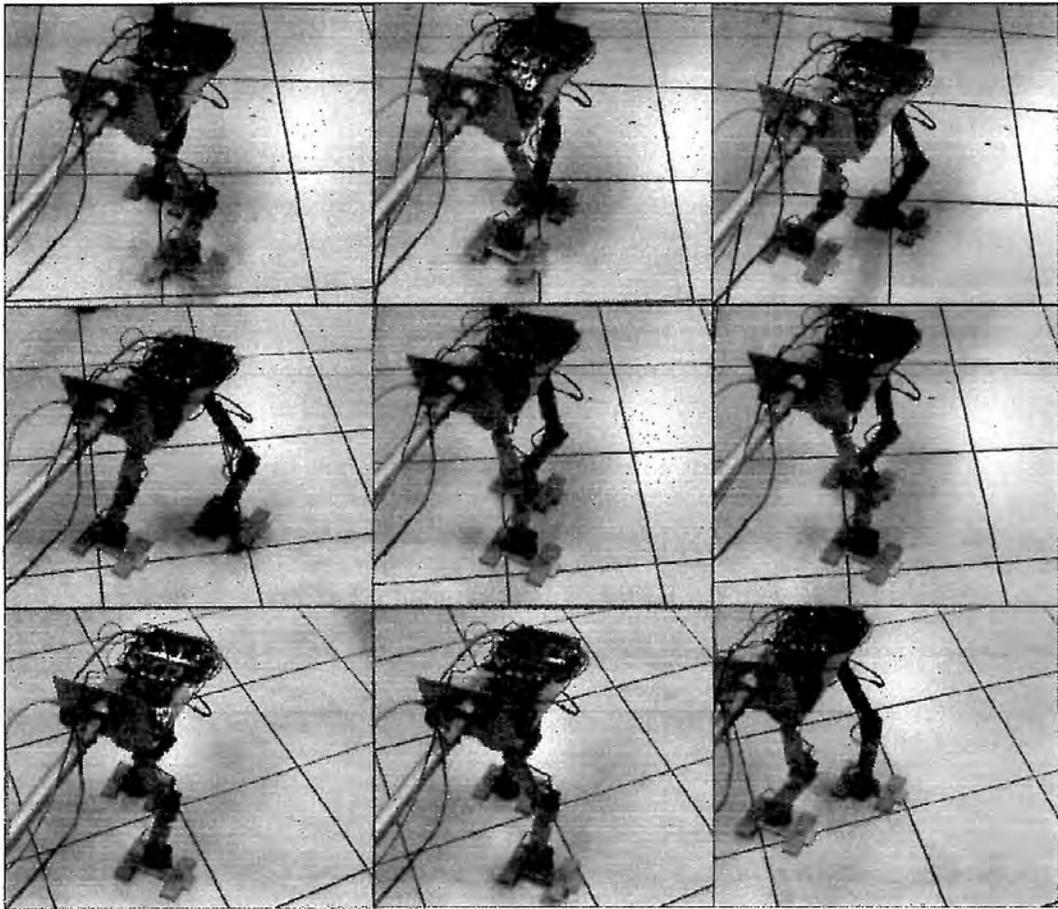


Figura 5.9: Secuencia de la caminata bípeda del prototipo RPY

5.5. Resultados y discusión

Una vez obtenida la correcta simulación del robot, se procede a la programación del controlador, en el cual se implementó el algoritmo planteado; este tiene algunas diferencias al de la simulación, como lo son; las ganancias seteadas para cada fase y el tiempo en el que estos se ejecutarán; esta variación se debe a las limitaciones propias de hardware; sin embargo, los resultados de la simulación nos ayudó a identificar las condiciones iniciales de cada fase en un tiempo determinado; así como una cierta proporcionalidad en las ganancias, el resultado se muestra en la Figura 5.9, en la cual se observa la secuencia de la caminata estable del prototipo RPY.

El robot logra una caminata estable en una trayectoria circular debido a

las limitaciones del soporte transversal, este genera una fuerza de rozamiento radial que pueden ser compensados con el uso de ruedas colocadas en los pies o algún otro material que amortigue el pequeño deslizamiento que existe entre el pie metálico y el piso de mayolica.

En un inicio el presente proyecto se planteó el uso de técnicas de seguimiento de trayectoria; estas eran obtenidas de estudios médicos los cuales se abocaban en la determinación de las trayectorias que se generan en una caminata humana; estas pueden ser descritas en formas de funciones e implementadas en el robot de manera que se considera a ambos pies como como efectores finales cuyas trayectorias son controladas con la técnica de la cinemática inversa. En cambio el modelo virtual ofrece una mejor performance, debido a que no depende de trayectorias, sino de fuerzas externas, como se muestra en la Figura 5.9.

5.6. Recomendaciones

- Para el modelamiento y simulación del robot es preferible la utilización de software libre, como Modelica o Gazebo y así depender menos de las licencias de software.
- Para tener una mejor aproximación a la caminata bípeda, se pueden usar conceptos de dinámica natural y técnicas de control pasivo en la generación de movimiento en cada una de las articulaciones.
- De preferencia priorizar el uso de motores DC, o motores Brushless, pues estos brindan mayor potencia y no limitan el modelo de control como si ocurre con los servomotores, estos deben contar con sus respectivos encoders, reductores y puentes H para el control de los mismos.
- En la implementación del mecanismo utilizar laminas de aluminio bien distribuidas que sujeten al servomotor; en el caso de motores DC, utilizar

uniones de metal mas sólidas capaz de soportar el peso de los motores.

- Se recomienda utilizar sensores de fuerza las cuales deben ser colocados en la planta del pie del robot, esto para obtener una mejor localización del centro de presión en el pie, en el momento en que este realiza una fase de caminata.
- Se recomienda utilizar el sensor de medición inercial - IMU, este debe ser colocado en la cadera del robot y así obtener datos más exactos de la ubicación del centro de masa en tiempo real.
- Para lograr una caminata en 3D sin la necesidad de adicionar un GDL, se recomienda usar elementos pasivos en la base del pie que permitan el balance necesario y así lograr no depender del soporte lateral.

CONCLUSIONES

- Se logró una caminata estable del prototipo RPY con la ayuda de un soporte transversal y la correcta aplicación de los conceptos de modelamiento virtual y una estrategia de control.
- Para una correcta simulación del modelamiento y estrategia de control planteado, fue necesario el desarrollo de un piso que interactuó con los pies del robot; pues éste en ningún momento tendrá un sistema de referencia fijo. En el software se representa al piso mediante el control de la fuerza de reacción entre un nivel y cuatro puntos que representan la planta del pie.
- *El planteamiento de una estrategia de control a base de una transición de estados que se ejecutan en un tiempo determinado y de manera independiente para cada pierna es una forma bastante eficiente de atacar el problema de la caminata estable, tanto para la simulación como para la implementación.*
- La implementación del prototipo RPY permite observar la respuesta de la simulación en el mecanismo, y se comprobó el funcionamiento del modelo y control planteado en esta tesis, teniendo en cuenta que siempre habrá una brecha entre los resultados de simulación con los resultados del prototipo RPY.

- Para la implementación del algoritmo de control en el prototipo RPY, fue necesaria la adaptación de los resultados de simulación, tales como los valores de las ganancias del controlador y los tiempos en que cada transición debe ejecutarse.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shuuji Kajita Kenji Kaneko Hirohiko Arai Noriho Koyachi Kazuo Tanie Qiang Huang, Kazuhito Yokoi. Planning walking patterns for a biped robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, June 2000.
- [2] Andy Ruina Steven H. Collins, Martijn Wisse. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *The International Journal of Robotics Research*, July 2001.
- [3] Matthew M. Williamson. Series elastic actuators. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, January 1995.
- [4] Gill Pratt Jerry Pratt, Peter Dilworth. Virtual model control of a bipedal walking. *International Conference on Robotics and Automation*, September 1997.
- [5] Benjamin T. Krupp Jerry E. Pratt. Series elastic actuators for legged robots.
- [6] Christine Chevallereau Jun Ho Choi Benjamin Morris Eric R. Westervelt, Jessy W. Grizzle. *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*. 2007.
- [7] Andy Ruina Mariano Garcia, Anindya Chatterjee. Efficiency, speed, and scaling of 2d passive dynamic walking. *Dynamics and Stability of Systems*, September 1999.

- [8] Mathew Missel Travis Craig Jerry E. Prat Peter D Neuhaus Hian Kai Kwa, Jerryll H. Noorden. Development of the ihmc mobility assist exoskeleton. *ICRA*, 2009.
- [9] E. Kljuno and R. L. Williams. Humanoid walking robot: Modeling, inverse dynamics, and gain scheduling control. *Journal of Robotics*, August 2010.
- [10] California Institute of Technology. *Discrete Mechanics and Optimal Control Applied to the Compass Gait Biped*. IEEE Conference on Decision and Control, December 2007.
- [11] Zhi-Wei Luo Kouichi Taji Yoji Uno Yuji Harata, Fumihiko Asano. Biped gait generation based on parametric excitation by knee-joint actuation. *Cambridge Journals*, 27, 2009.
- [12] Y Ogura Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi. Locomotion pattern generation and mechanisms of a new biped walking machine. In *The Royal Society*, May 2011.
- [13] Jürgen Rummel André Seyfarth Fumiya lida, Yohei Minekawa. Toward a human-like biped robot with compliant legs. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009.
- [14] Ahmad Bagheri Peiman Naseradin Mousavi. Mathematical simulation of a seven link biped robot on various surfaces and zmp considerations. *Science Direct*, September 2006.
- [15] Andy Ruina Michael Coleman Mariano Garcia, Anindya Chatterjee. The simplest walking model: Stability, complexity, and scaling. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, February 1998.
- [16] Chistohper G. Garth Zeglin Jun Morimoto, Jun Nakanishi. Poincaré-map-based reinforcement learning for biped walking. 2005.

- [17] Ming fai Fong. Mechanical design of a simple bipedal robot. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2005.
- [18] Atsuo Kawamura Yasutaka Fujimoto. Attitude control experiments of biped walking robot based on environmental force interaction. *Workshop. on Advanced Motion Control*.
- [19] Martin Bretschneider. *Untersuchungen zur Sturzerkennung zweibeiniger Roboter mit Hilfe von Verfahren zur Mustererkennung*. PhD thesis, Hannover University, 2005.
- [20] MathWorks Inc. *Manual SimMechanics*, 2011.
- [21] Brian T. Knox. Design of a biped robot capable of dynamic maneuvers. Master's thesis, Ohio State University, 2008.
- [22] Texas Instruments, <http://www.ti.com/tool/tmdsdock28335>. *Kit Experimenter*, 2010.

APÉNDICE A

Especificaciones del prototipo RPY

En esta sección se denota datos generales del mecanismo del RPY, controlador, sensores, actuadores, y tarjetaz electrónicas utilizados en la implementación.

A.1. Estructura

A continuación se muestra el plano de acoplamiento de cada uno de los componentes del robot (ver Figura A.1).

A.1.1. Planos

A continuación se muestran los planos generados desde SolidWorks para cada uno de los componentes (ver Figuras A.2 hasta A.9).

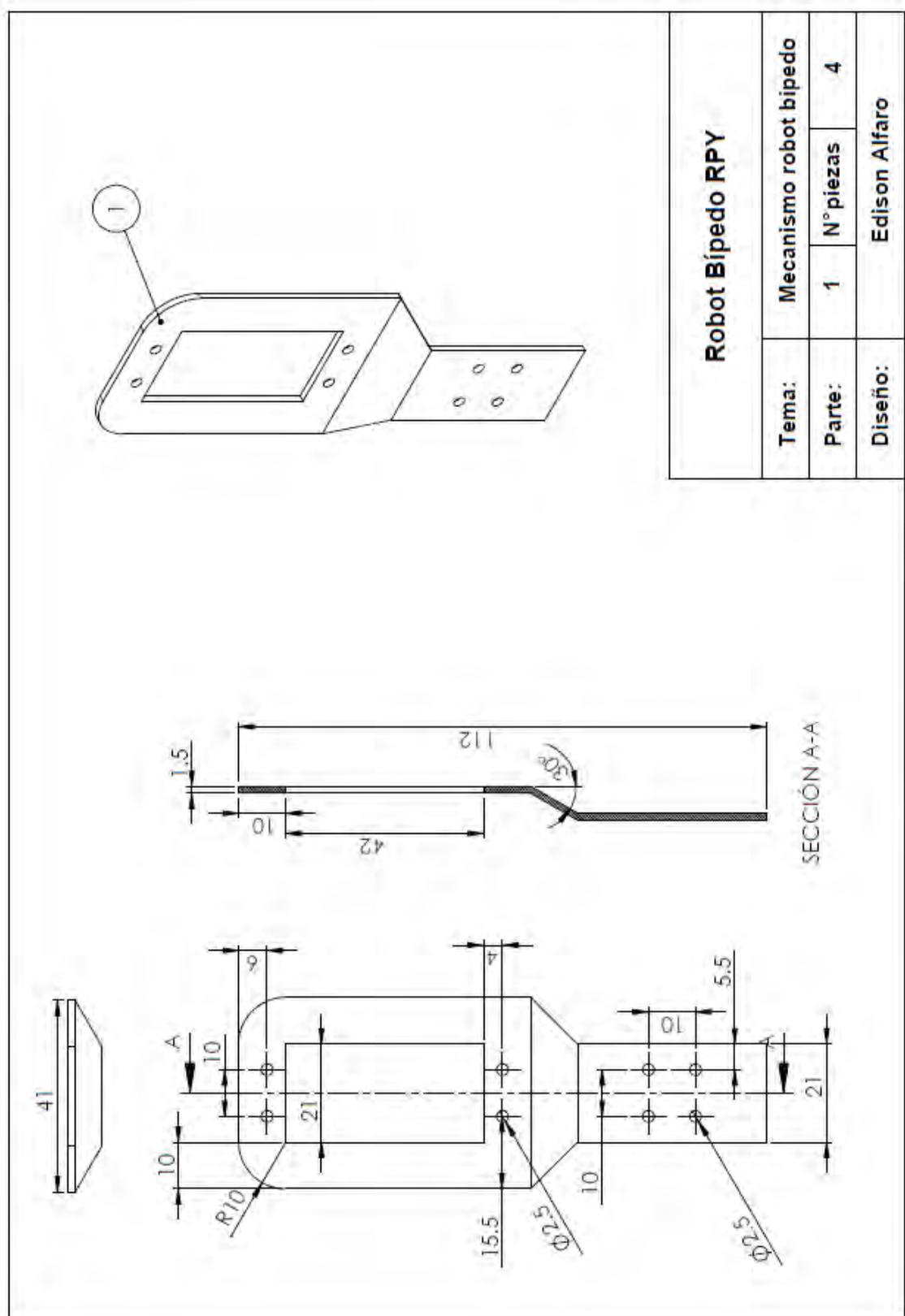


Figura A.2: Soporte del servomotor

A.2. Controlador

Se utiliza el Kit Experimenter 28336 de Texas Instrument, cuyas algunas de sus características mas resaltantes se muestran en la Figuras A.10 hasta A.13.

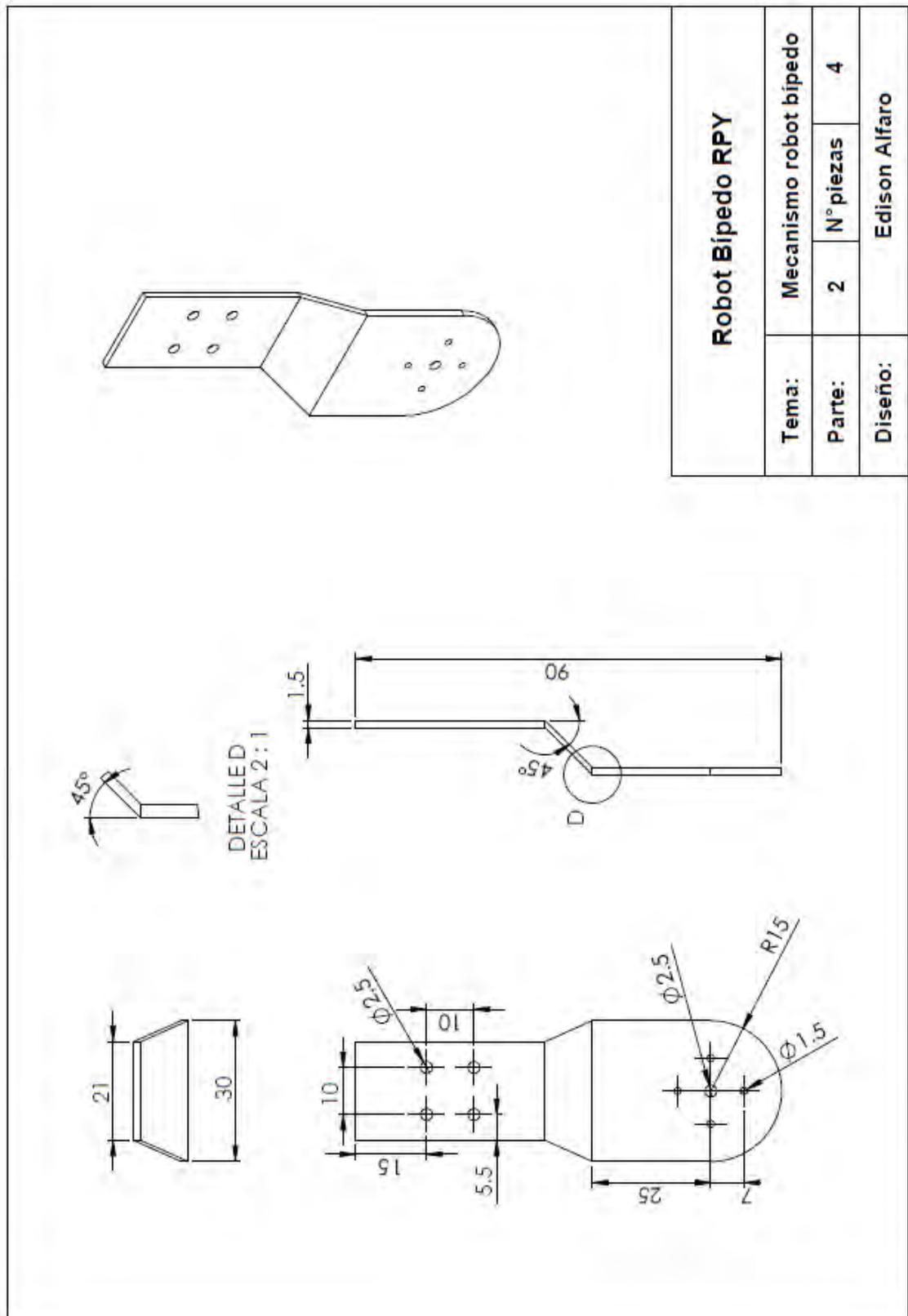


Figura A.3: Unión del sevomotor

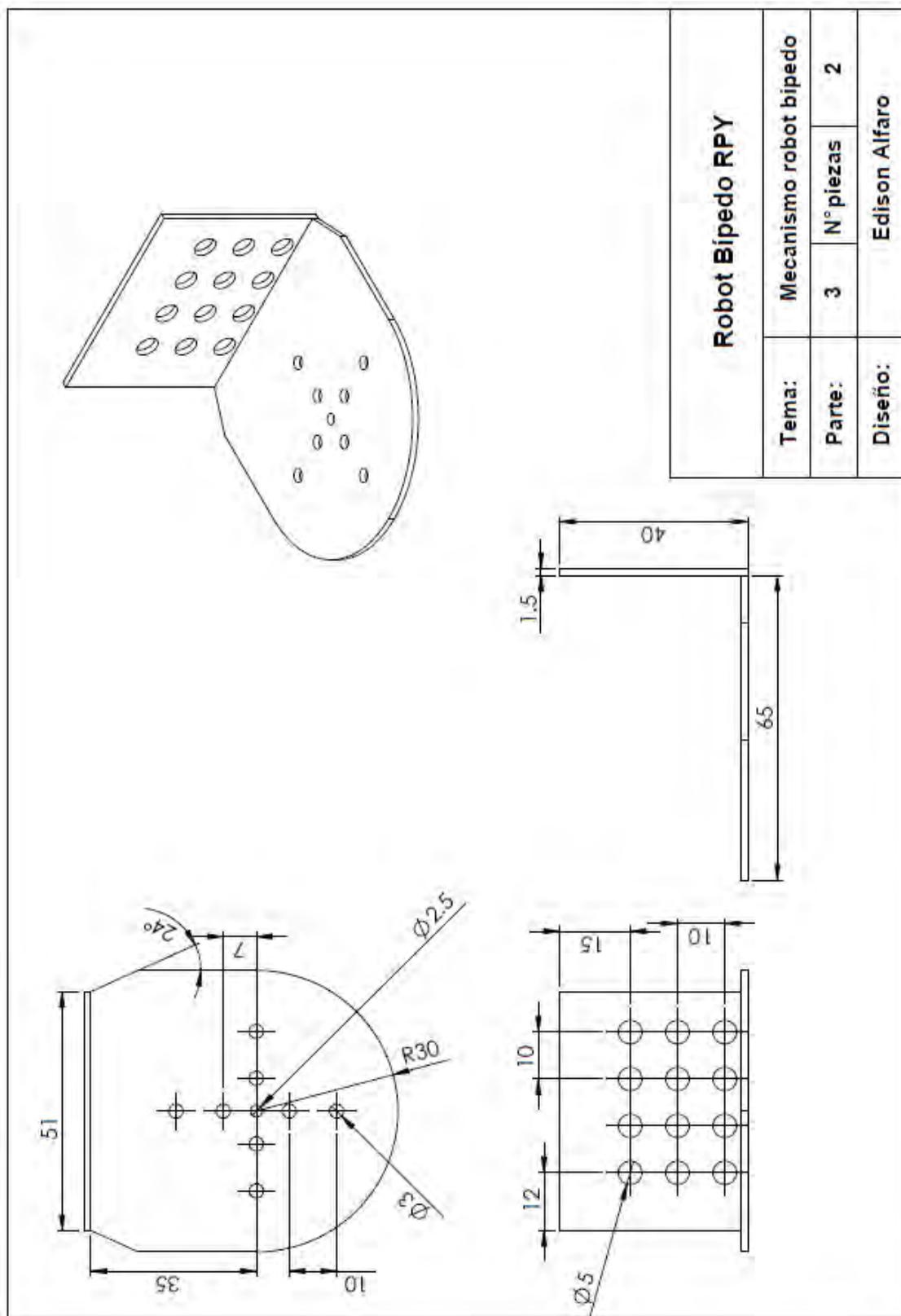


Figura A.4: Unión de la cadera y pierna

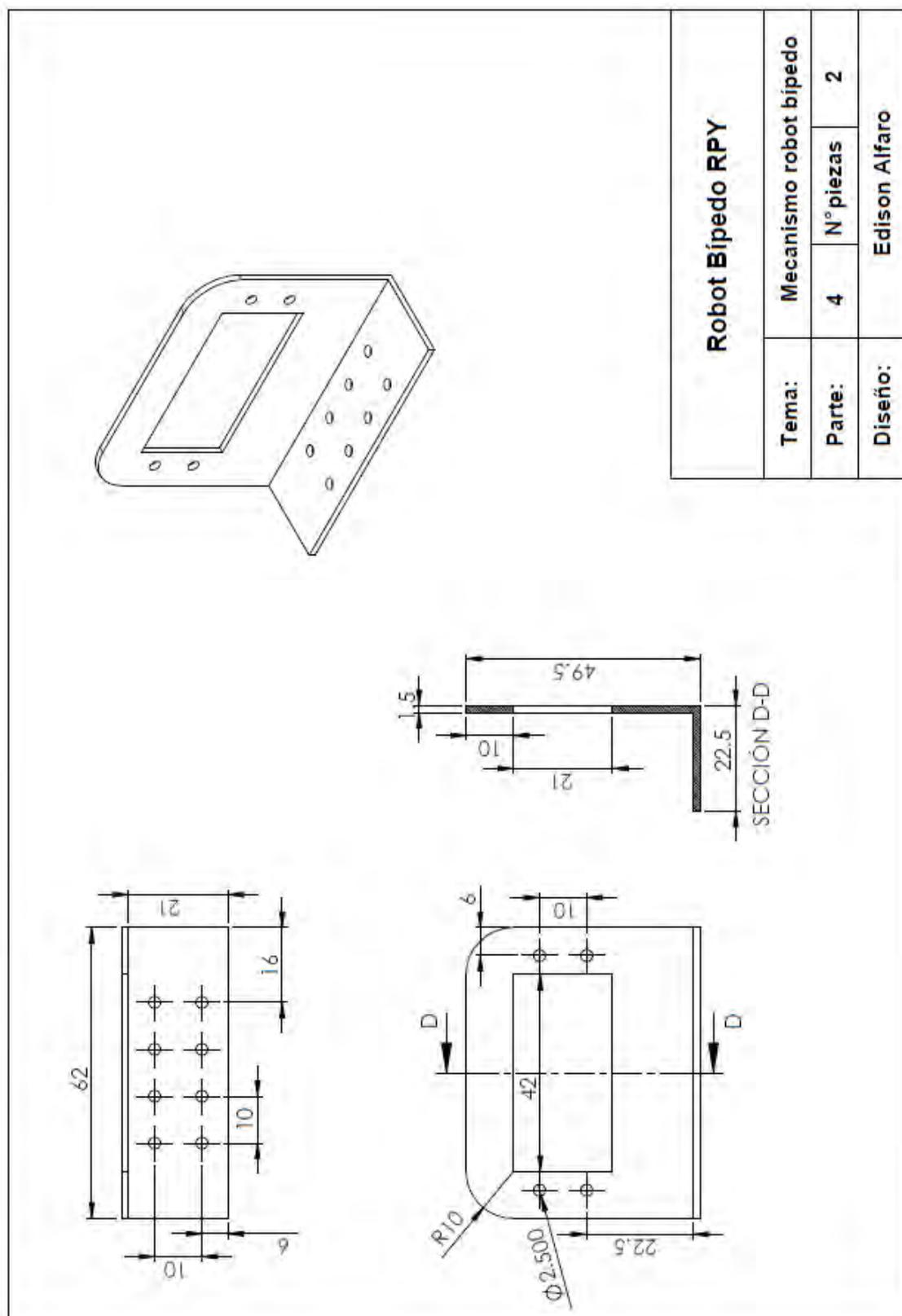


Figura A.5: Soporte de servomotor del tobillo

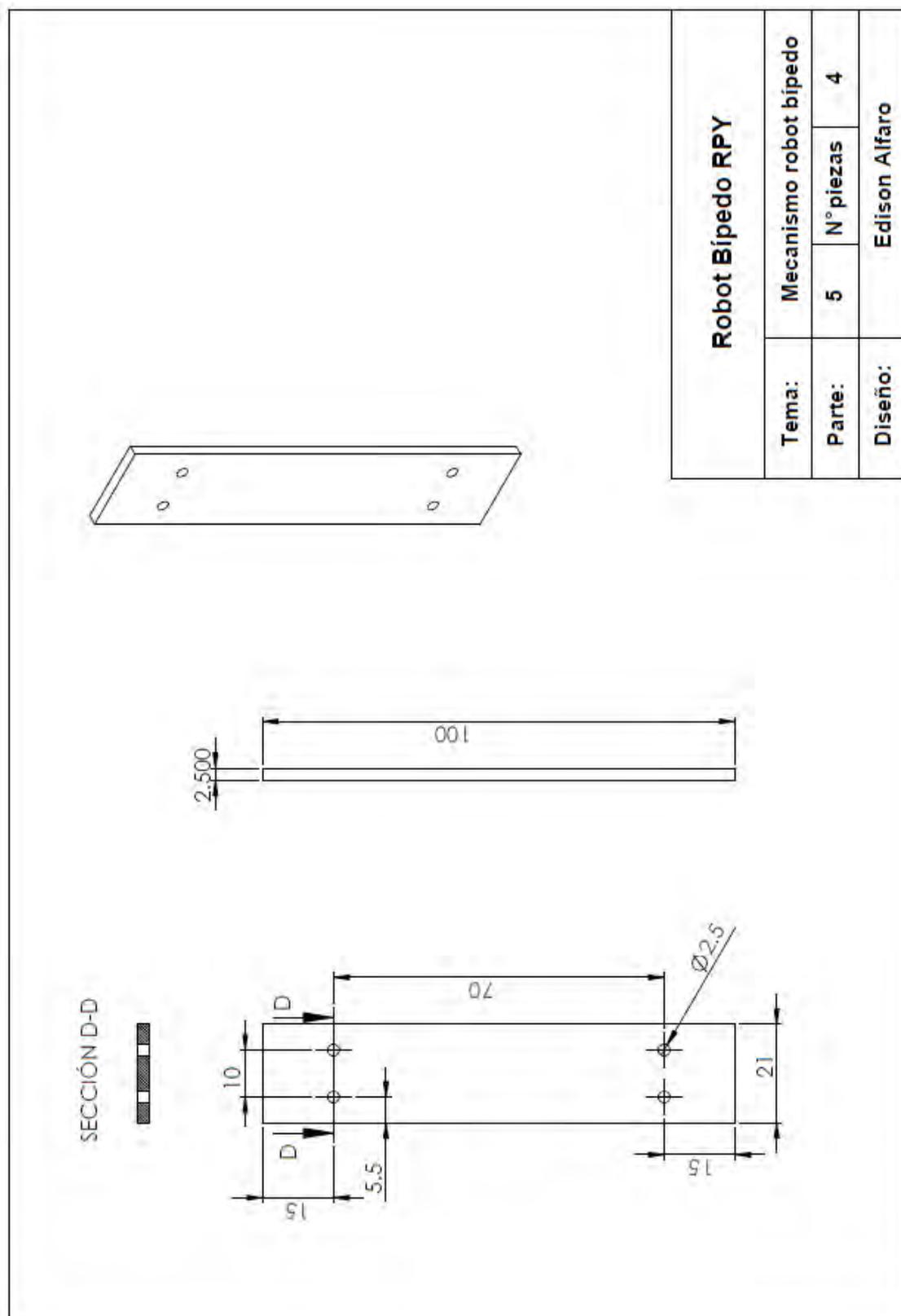


Figura A.6: Barras de unión de pierna

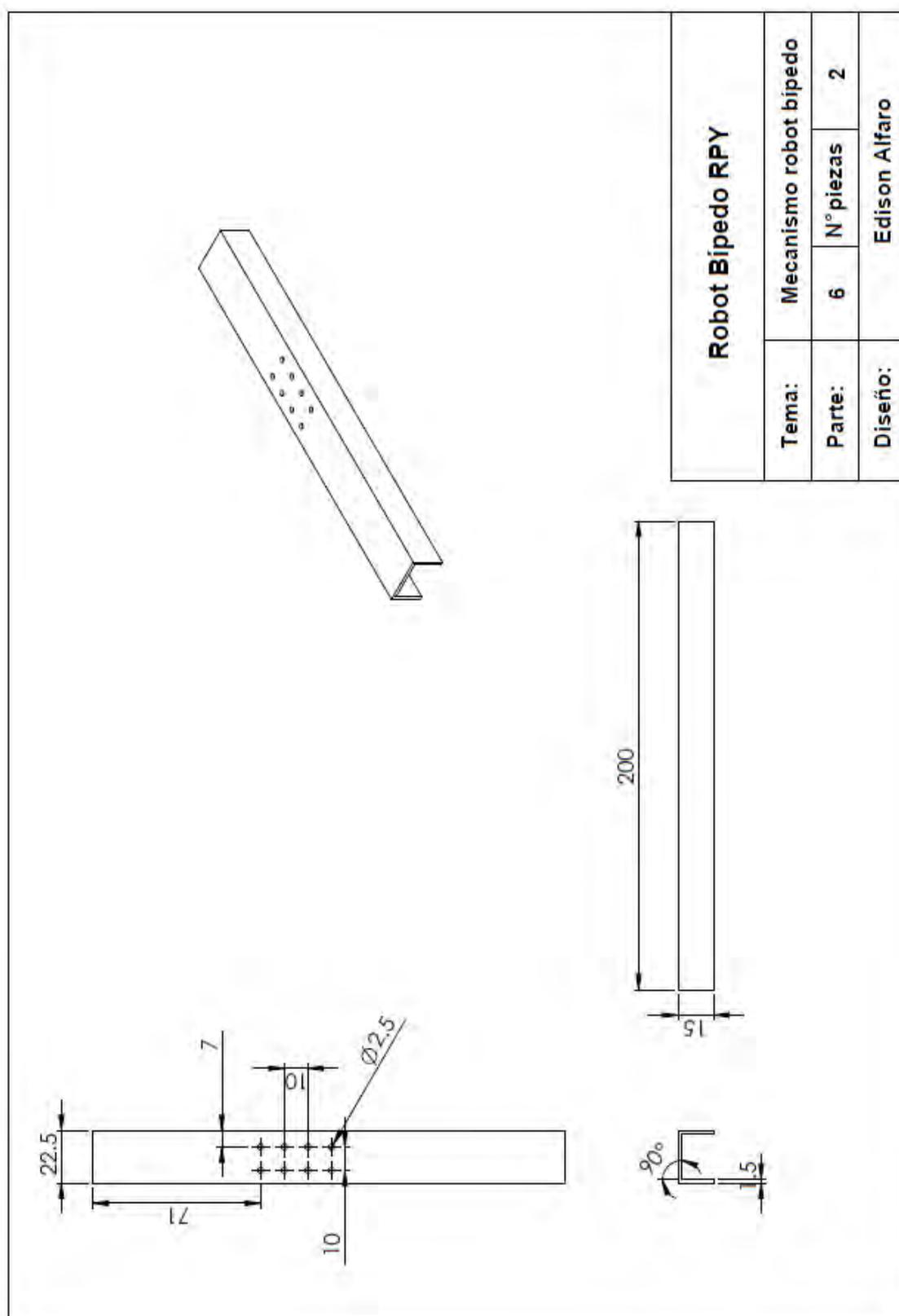


Figura A.7: Barra de soporte del pie

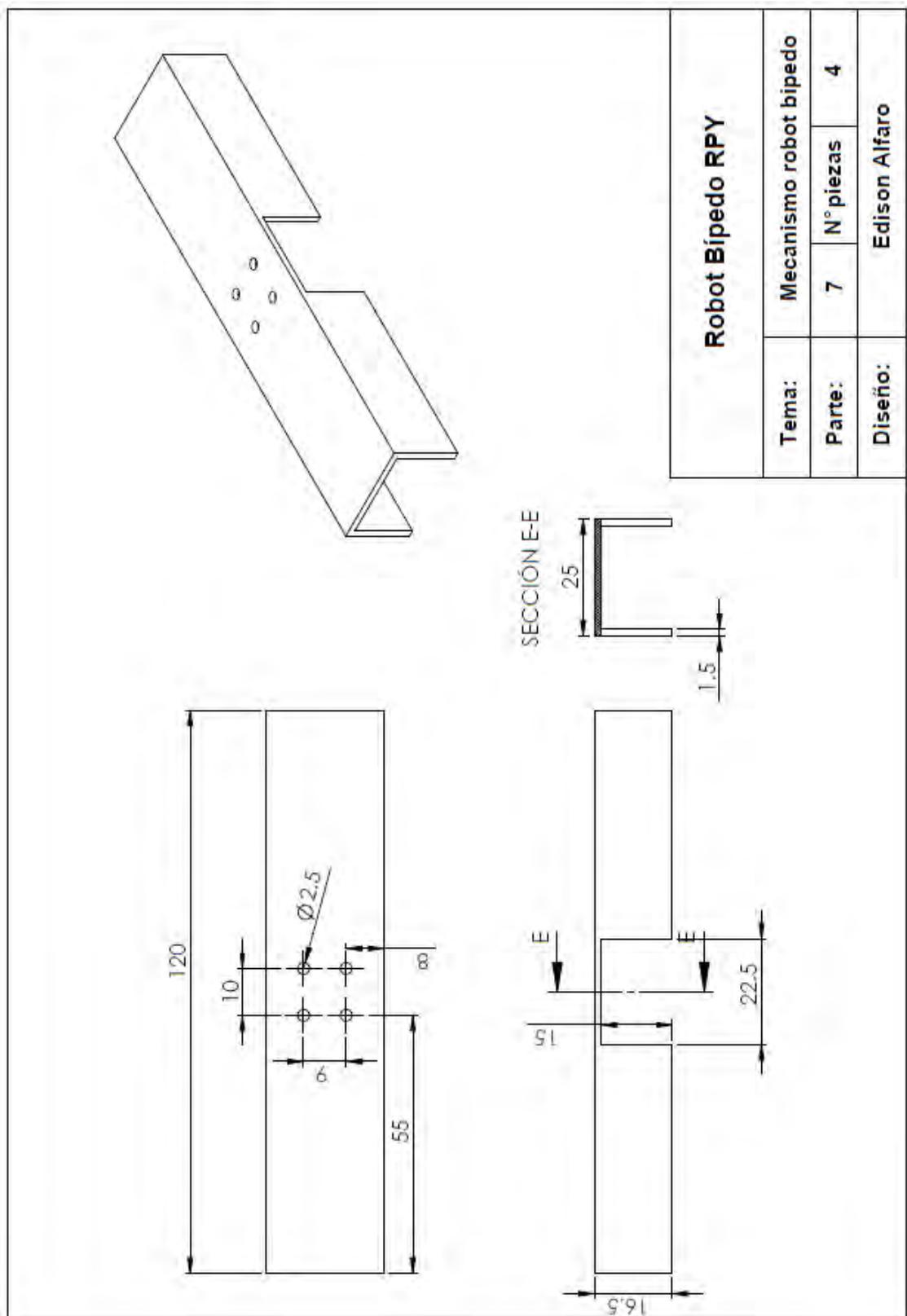


Figura A.8: Barra de soporte del pie

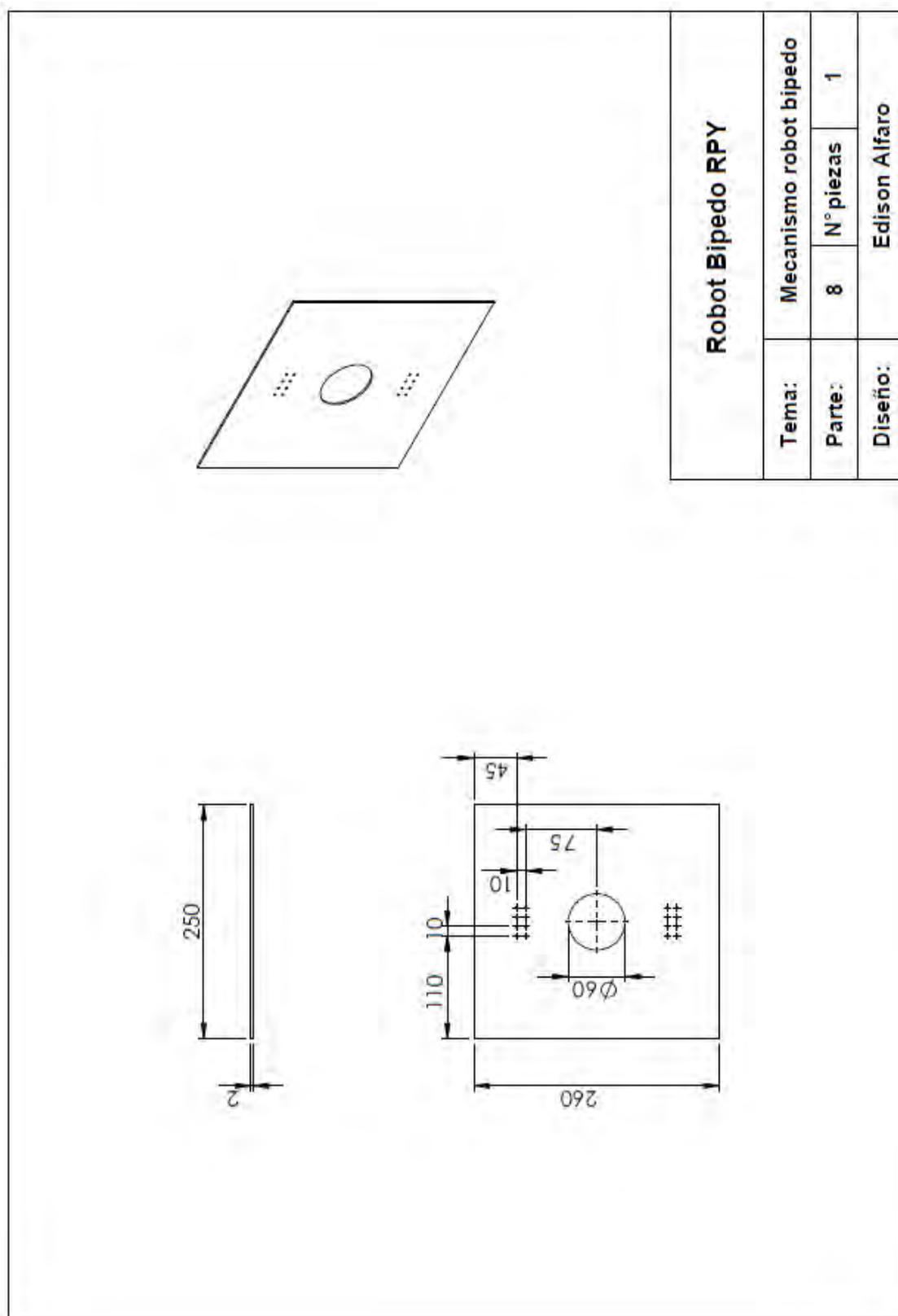


Figura A.9: Soporte principal

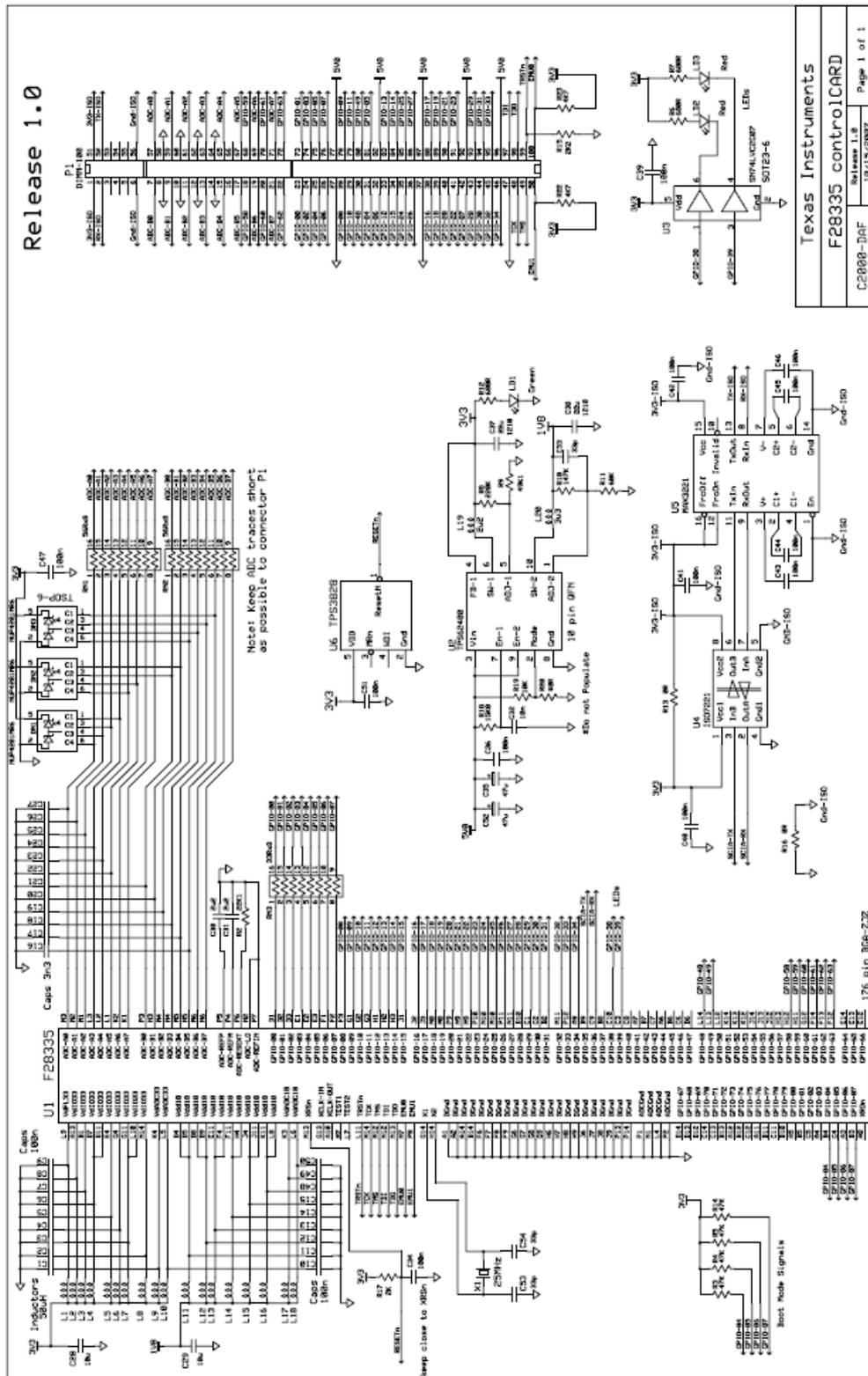


Figura A.10: Kit Experimenter 1

En la Figura A.14 se observa la distribución de pines de conexión ADC; entrada y salida digital; y salidas PWM del módulo kit experimenter F28335.

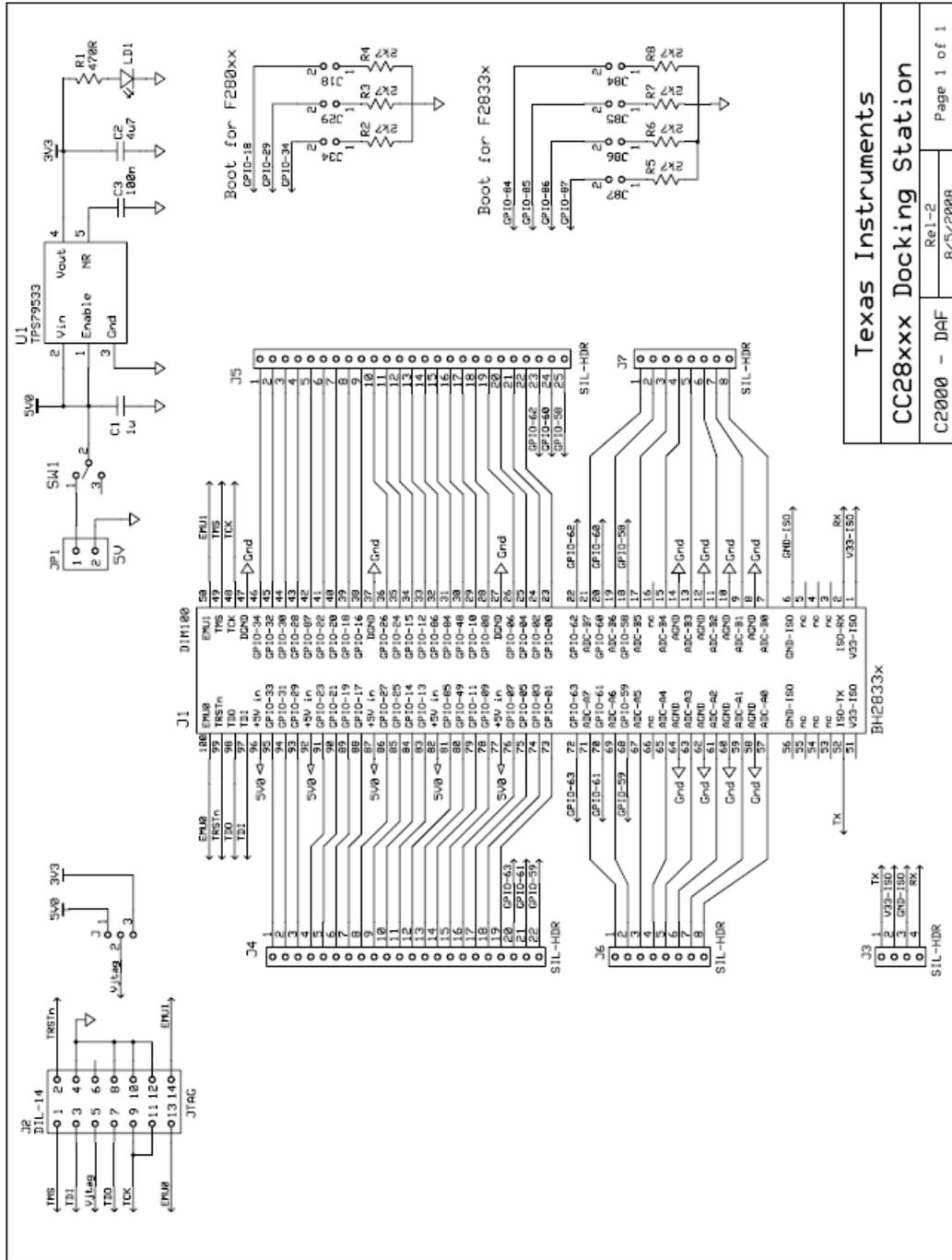
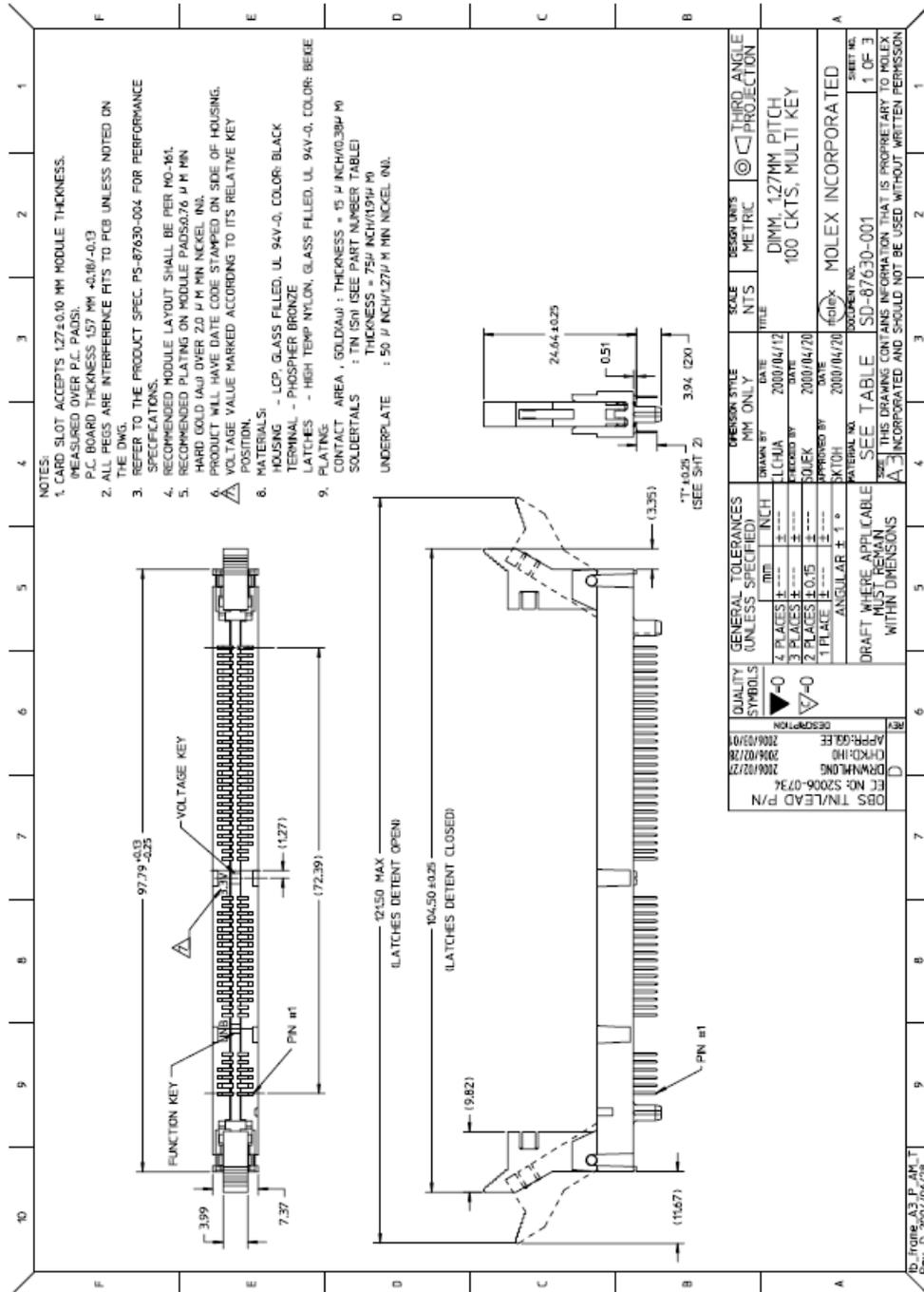


Figura A.11: Kit Experimenter 2



- NOTES:
- CARD SLOT ACCEPTS 127±0.10 MM MODULE THICKNESS. (MEASURED OVER P.C. PADS).
 - P.C. BOARD THICKNESS 157 MM ±0.10/-0.13
 - ALL PEGS ARE INTERFERENCE FITS TO PCB UNLESS NOTED ON THE DWG.
 - REFER TO THE PRODUCT SPEC. PS-87630-004 FOR PERFORMANCE SPECIFICATIONS.
 - RECOMMENDED MODULE LAYOUT SHALL BE PER MO-161.
 - RECOMMENDED PLATING ON MODULE PADS: 0.76 μm MIN HARD GOLD (Au) OVER 2.0 μm MIN NICKEL (Ni).
 - PRODUCT WILL HAVE DATE CODE STAMPED ON SIDE OF HOUSING.
 - VOLTAGE VALUE MARKED ACCORDING TO ITS RELATIVE KEY POSITION.
 - MATERIALS:
 - HOUSING - LCP, GLASS FILLED, UL 94V-0, COLOR: BLACK
 - TERMINAL - PHOSPHOR BRONZE
 - LATCHES - HIGH TEMP NYLON, GLASS FILLED, UL 94V-0, COLOR: BEIGE
 - PLATING -
 - CONTACT AREA - GOLD (Au) : THICKNESS = 15 μm INCH(0.30μm)
 - SOLDERTAILS : TIN (Sn) (SEE PART NUMBER TABLE) THICKNESS = 75μ INCH(1.91μm)
 - UNDERPLATE : 50 μm INCH(1.27μm) MIN NICKEL (Ni).
 - PLATING -
 - CONTACT AREA - GOLD (Au) : THICKNESS = 15 μm INCH(0.30μm)
 - SOLDERTAILS : TIN (Sn) (SEE PART NUMBER TABLE) THICKNESS = 75μ INCH(1.91μm)
 - UNDERPLATE : 50 μm INCH(1.27μm) MIN NICKEL (Ni).

QUALITY SYMBOLS	GENERAL TOLERANCES (UNLESS SPECIFIED)	DESIGN STYLE	SCALE	DESIGN UNITS	THIRD ANGLE PROJECTION
▽-0	1 PLACES ± .010	MM ONLY	NTS	METRIC	
▽-0	2 PLACES ± .015	DATE			
	3 PLACES ± .020	2000/04/12			
	4 PLACES ± .030	2000/04/20			
	5 PLACES ± .040	2000/04/20			
	6 PLACES ± .050	2000/04/20			
	7 PLACES ± .060	2000/04/20			
	8 PLACES ± .070	2000/04/20			
	9 PLACES ± .080	2000/04/20			
	10 PLACES ± .090	2000/04/20			
	11 PLACES ± .100	2000/04/20			
	12 PLACES ± .110	2000/04/20			
	13 PLACES ± .120	2000/04/20			
	14 PLACES ± .130	2000/04/20			
	15 PLACES ± .140	2000/04/20			
	16 PLACES ± .150	2000/04/20			
	17 PLACES ± .160	2000/04/20			
	18 PLACES ± .170	2000/04/20			
	19 PLACES ± .180	2000/04/20			
	20 PLACES ± .190	2000/04/20			
	21 PLACES ± .200	2000/04/20			
	22 PLACES ± .210	2000/04/20			
	23 PLACES ± .220	2000/04/20			
	24 PLACES ± .230	2000/04/20			
	25 PLACES ± .240	2000/04/20			
	26 PLACES ± .250	2000/04/20			
	27 PLACES ± .260	2000/04/20			
	28 PLACES ± .270	2000/04/20			
	29 PLACES ± .280	2000/04/20			
	30 PLACES ± .290	2000/04/20			
	31 PLACES ± .300	2000/04/20			
	32 PLACES ± .310	2000/04/20			
	33 PLACES ± .320	2000/04/20			
	34 PLACES ± .330	2000/04/20			
	35 PLACES ± .340	2000/04/20			
	36 PLACES ± .350	2000/04/20			
	37 PLACES ± .360	2000/04/20			
	38 PLACES ± .370	2000/04/20			
	39 PLACES ± .380	2000/04/20			
	40 PLACES ± .390	2000/04/20			
	41 PLACES ± .400	2000/04/20			
	42 PLACES ± .410	2000/04/20			
	43 PLACES ± .420	2000/04/20			
	44 PLACES ± .430	2000/04/20			
	45 PLACES ± .440	2000/04/20			
	46 PLACES ± .450	2000/04/20			
	47 PLACES ± .460	2000/04/20			
	48 PLACES ± .470	2000/04/20			
	49 PLACES ± .480	2000/04/20			
	50 PLACES ± .490	2000/04/20			
	51 PLACES ± .500	2000/04/20			
	52 PLACES ± .510	2000/04/20			
	53 PLACES ± .520	2000/04/20			
	54 PLACES ± .530	2000/04/20			
	55 PLACES ± .540	2000/04/20			
	56 PLACES ± .550	2000/04/20			
	57 PLACES ± .560	2000/04/20			
	58 PLACES ± .570	2000/04/20			
	59 PLACES ± .580	2000/04/20			
	60 PLACES ± .590	2000/04/20			
	61 PLACES ± .600	2000/04/20			
	62 PLACES ± .610	2000/04/20			
	63 PLACES ± .620	2000/04/20			
	64 PLACES ± .630	2000/04/20			
	65 PLACES ± .640	2000/04/20			
	66 PLACES ± .650	2000/04/20			
	67 PLACES ± .660	2000/04/20			
	68 PLACES ± .670	2000/04/20			
	69 PLACES ± .680	2000/04/20			
	70 PLACES ± .690	2000/04/20			
	71 PLACES ± .700	2000/04/20			
	72 PLACES ± .710	2000/04/20			
	73 PLACES ± .720	2000/04/20			
	74 PLACES ± .730	2000/04/20			
	75 PLACES ± .740	2000/04/20			
	76 PLACES ± .750	2000/04/20			
	77 PLACES ± .760	2000/04/20			
	78 PLACES ± .770	2000/04/20			
	79 PLACES ± .780	2000/04/20			
	80 PLACES ± .790	2000/04/20			
	81 PLACES ± .800	2000/04/20			
	82 PLACES ± .810	2000/04/20			
	83 PLACES ± .820	2000/04/20			
	84 PLACES ± .830	2000/04/20			
	85 PLACES ± .840	2000/04/20			
	86 PLACES ± .850	2000/04/20			
	87 PLACES ± .860	2000/04/20			
	88 PLACES ± .870	2000/04/20			
	89 PLACES ± .880	2000/04/20			
	90 PLACES ± .890	2000/04/20			
	91 PLACES ± .900	2000/04/20			
	92 PLACES ± .910	2000/04/20			
	93 PLACES ± .920	2000/04/20			
	94 PLACES ± .930	2000/04/20			
	95 PLACES ± .940	2000/04/20			
	96 PLACES ± .950	2000/04/20			
	97 PLACES ± .960	2000/04/20			
	98 PLACES ± .970	2000/04/20			
	99 PLACES ± .980	2000/04/20			
	100 PLACES ± .990	2000/04/20			
	101 PLACES ± 1.000	2000/04/20			
	102 PLACES ± 1.010	2000/04/20			
	103 PLACES ± 1.020	2000/04/20			
	104 PLACES ± 1.030	2000/04/20			
	105 PLACES ± 1.040	2000/04/20			
	106 PLACES ± 1.050	2000/04/20			
	107 PLACES ± 1.060	2000/04/20			
	108 PLACES ± 1.070	2000/04/20			
	109 PLACES ± 1.080	2000/04/20			
	110 PLACES ± 1.090	2000/04/20			
	111 PLACES ± 1.100	2000/04/20			
	112 PLACES ± 1.110	2000/04/20			
	113 PLACES ± 1.120	2000/04/20			
	114 PLACES ± 1.130	2000/04/20			
	115 PLACES ± 1.140	2000/04/20			
	116 PLACES ± 1.150	2000/04/20			
	117 PLACES ± 1.160	2000/04/20			
	118 PLACES ± 1.170	2000/04/20			
	119 PLACES ± 1.180	2000/04/20			
	120 PLACES ± 1.190	2000/04/20			
	121 PLACES ± 1.200	2000/04/20			
	122 PLACES ± 1.210	2000/04/20			
	123 PLACES ± 1.220	2000/04/20			
	124 PLACES ± 1.230	2000/04/20			
	125 PLACES ± 1.240	2000/04/20			
	126 PLACES ± 1.250	2000/04/20			
	127 PLACES ± 1.260	2000/04/20			
	128 PLACES ± 1.270	2000/04/20			
	129 PLACES ± 1.280	2000/04/20			
	130 PLACES ± 1.290	2000/04/20			
	131 PLACES ± 1.300	2000/04/20			
	132 PLACES ± 1.310	2000/04/20			
	133 PLACES ± 1.320	2000/04/20			
	134 PLACES ± 1.330	2000/04/20			
	135 PLACES ± 1.340	2000/04/20			
	136 PLACES ± 1.350	2000/04/20			
	137 PLACES ± 1.360	2000/04/20			
	138 PLACES ± 1.370	2000/04/20			
	139 PLACES ± 1.380	2000/04/20			
	140 PLACES ± 1.390	2000/04/20			
	141 PLACES ± 1.400	2000/04/20			
	142 PLACES ± 1.410	2000/04/20			
	143 PLACES ± 1.420	2000/04/20			
	144 PLACES ± 1.430	2000/04/20			
	145 PLACES ± 1.440	2000/04/20			
	146 PLACES ± 1.450	2000/04/20			
	147 PLACES ± 1.460	2000/04/20			
	148 PLACES ± 1.470	2000/04/20			
	149 PLACES ± 1.480	2000/04/20			
	150 PLACES ± 1.490	2000/04/20			
	151 PLACES ± 1.500	2000/04/20			
	152 PLACES ± 1.510	2000/04/20			
	153 PLACES ± 1.520	2000/04/20			
	154 PLACES ± 1.530	2000/04/20			
	155 PLACES ± 1.540	2000/04/20			
	156 PLACES ± 1.550	2000/04/20			
	157 PLACES ± 1.560	2000/04/20			
	158 PLACES ± 1.570	2000/04/20			
	159 PLACES ± 1.580	2000/04/20			
	160 PLACES ± 1.590	2000/04/20			
	161 PLACES ± 1.600	2000/04/20			
	162 PLACES ± 1.610	2000/04/20			
	163 PLACES ± 1.620	2000/04/20			
	164 PLACES ± 1.630	2000/04/20			
	165 PLACES ± 1.640	2000/04/20			
	166 PLACES ± 1.650	2000/04/20			
	167 PLACES ± 1.660	2000/04/20			
	168 PLACES ± 1.670	2000/04/20			
	169 PLACES ± 1.680	2000/04/20			
	170 PLACES ± 1.690	2000/04/20			
	171 PLACES ± 1.700	2000/04/20			
	172 PLACES ± 1.710	2000/04/20			
	173 PLACES ± 1.720	2000/04/20			
	174 PLACES ± 1.730	2000/04/20			
	175 PLACES ± 1.740	2000/04/20			
	176 PLACES ± 1.750	2000/04/20			
	177 PLACES ± 1.760	2000/04/20			
	178 PLACES ± 1.770	2000/04/20			
	179 PLACES ± 1.780	2000/04/20			
	180 PLACES ± 1.790	2000/04/20			
	181 PLACES ± 1.800	2000/04/20			
	182 PLACES ± 1.810	2000/04/20			
	183 PLACES ± 1.820	2000/04/20			
	184 PLACES ± 1.830	2000/04/20			
	185 PLACES ± 1.840	2000/04/20			
	186 PLACES ± 1.850	2000/04/20			
	187 PLACES ± 1.860	2000/04/20			
	188 PLACES ± 1.870	2000/04/20			
	189 PLACES ± 1.880	2000/04/20			
	190 PLACES ± 1.890	2000/04/20			
	191 PLACES ± 1.900	2000/04/20			
	1				

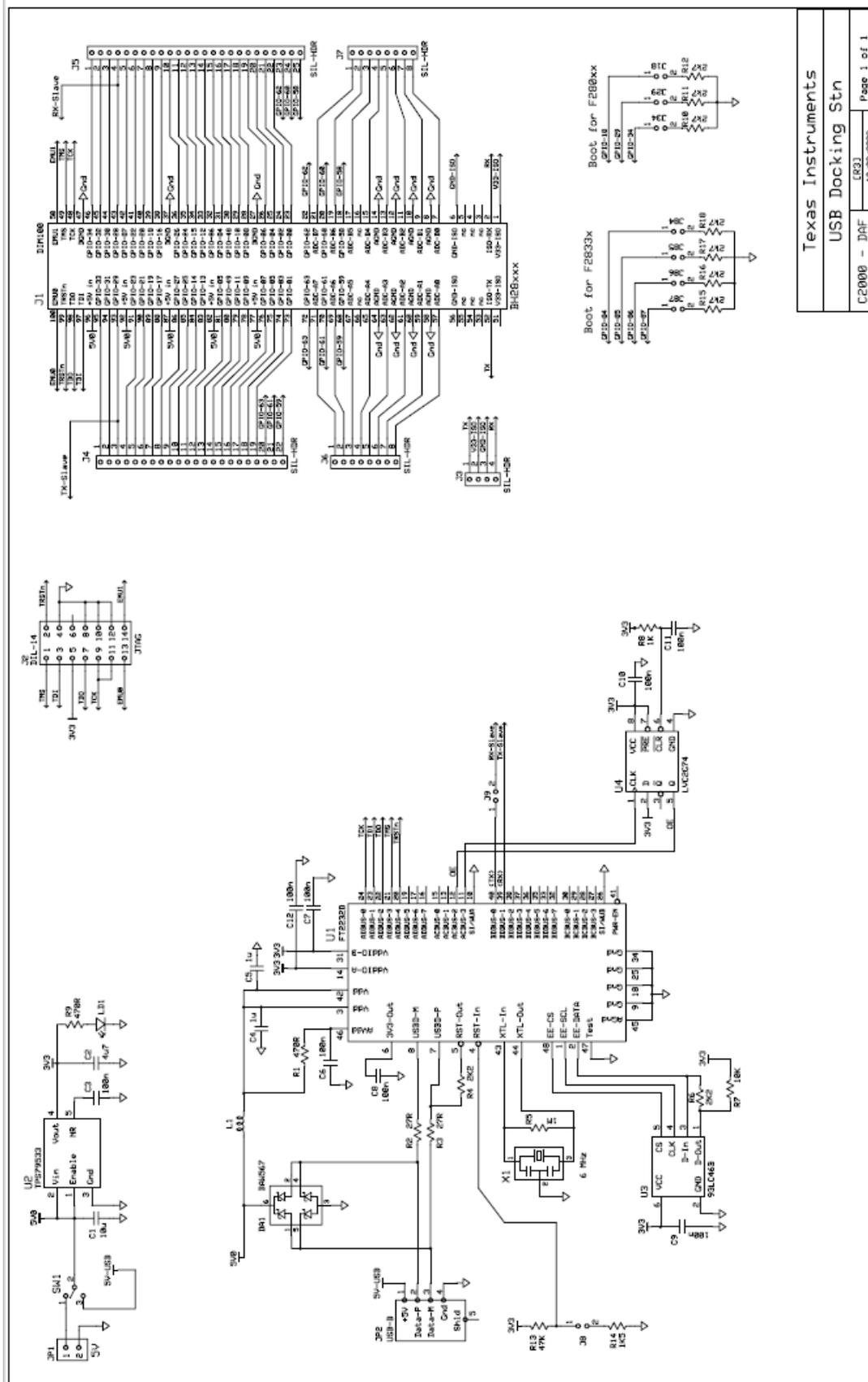


Figura A.13: Kit Experimenter 4

F28335 controlCARD [R1.0] DIMM100 pin-out

V33D-ISO	1	51	V33D-ISO
ISO-RX-RS232	2	52	ISO-TX-RS232
	3	53	
	4	54	
	5	55	
GND_ISO	6	56	GND_ISO
ADCIN-B0	7	57	ADCIN-A0
GND	8	58	GND
ADCIN-B1	9	59	ADCIN-A1
GND	10	60	GND
ADCIN-B2	11	61	ADCIN-A2
GND	12	62	GND
ADCIN-B3	13	63	ADCIN-A3
GND	14	64	GND
ADCIN-B4	15	65	ADCIN-A4
	16	66	
ADCIN-B5	17	67	ADCIN-A5
GPIO-58 / MCLKR-A / XD21 (EMIF)	18	68	GPIO-59 / MFSR-A / XD20 (EMIF)
ADCIN-B6	19	69	ADCIN-A6
GPIO-60 / MCLKR-B / XD19 (EMIF)	20	70	GPIO-61 / MFSR-B / XD18 (EMIF)
ADCIN-B7	21	71	ADCIN-A7
GPIO-62 / SCIRX-C / XD17 (EMIF)	22	72	GPIO-63 / SCITX-C / XD16 (EMIF)
GPIO-00 / EPWM-1A	23	73	GPIO-01 / EPWM-1B / MFSR-B
GPIO-02 / EPWM-2A	24	74	GPIO-03 / EPWM-2B / MCLKR-B
GPIO-04 / EPWM-3A	25	75	GPIO-05 / EPWM-3B / MFSR-A / ECAP-1
GPIO-06 / EPWM-4A / SYNC1 / SYNC0	26	76	GPIO-07 / EPWM-4B / MCLKR-A / ECAP-2
GND	27	77	+5V _{in}
GPIO-08 / EPWM-5A / CANTX-B / ADCSOC-A	28	78	GPIO-09 / EPWM-5B / SCITX-B / ECAP-3
GPIO-10 / EPWM-6A / CANRX-B / ADCSOC-B	29	79	GPIO-11 / EPWM-6B / SCIRX-B / ECAP-4
GPIO-48 / ECAPS / XD31 (EMIF)	30	80	GPIO-49 / ECAP6 / XD30 (EMIF)
GPIO-84	31	81	GPIO-85
GPIO-86	32	82	+5V _{in}
GPIO-12 / TZ-1 / CANTX-B / MDX-B	33	83	GPIO-13 / TZ-2 / CANRX-B / MDR-B
GPIO-15 / TZ-4 / SCIRX-B / MFSX-B	34	84	GPIO-14 / TZ-3 / SCITX-B / MCLKX-B
GPIO-24 / ECAP-1 / EQEPA-2 / MDX-B	35	85	GPIO-25 / ECAP-2 / EQEPB-2 / MDR-B
GPIO-26 / ECAP-3 / EQEPI-2 / MCLKX-B	36	86	GPIO-27 / ECAP-4 / EQEPS-2 / MFSX-B
GND	37	87	+5V _{in}
GPIO-16 / SPISIMO-A / CANTX-B / TZ-5	38	88	GPIO-17 / SPISOMI-A / CANRX-B / TZ-6
GPIO-18 / SPICLK-A / SCITX-B	39	89	GPIO-19 / SPISITE-A / SCIRX-B
GPIO-20 / EQEPA-1 / MDX-A / CANTX-B	40	90	GPIO-21 / EQEPB-1 / MDR-A / CANRX-B
GPIO-22 / EQEPS-1 / MCLKX-A / SCITX-B	41	91	GPIO-23 / EQEPI-1 / MFSX-A / SCIRX-B
GPIO-87	42	92	+5V _{in}
GPIO-28 / SCIRX-A / Resv / TZ5	43	93	GPIO-29 / SCITX-A / Resv / TZ6
GPIO-30 / CANRX-A	44	94	GPIO-31 / CANTX-A
GPIO-32 / I2CSDA / SYNC1 / ADCSOCA	45	95	GPIO-33 / I2CSCL / SYNC0 / ADCSOCA
GPIO-34 / ECAP1 / XREADY (EMIF)	46	96	+5V _{in}
GND	47	97	TDI
TCK	48	98	TDO
TMS	49	99	TRST _n
EMU1	50	100	EMU0

Figura A.14: Kit Experimenter 5

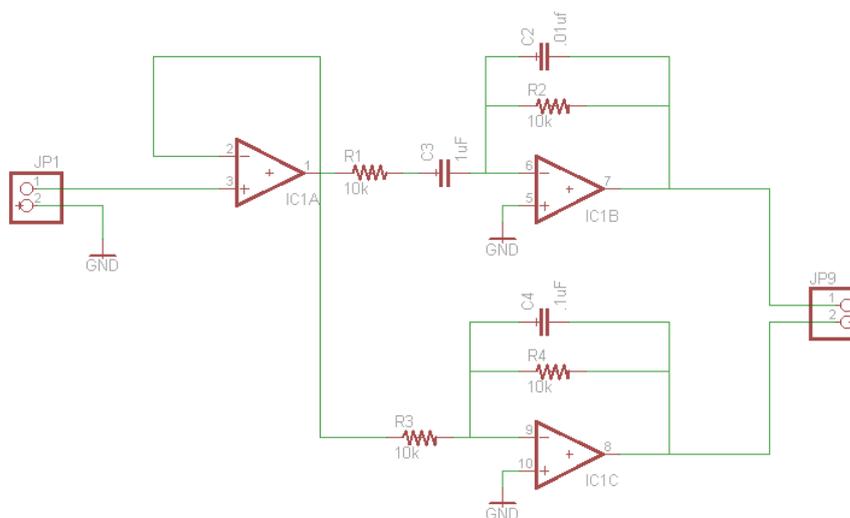


Figura A.15: Simulación del circuito de sensor de posición y velocidad angular

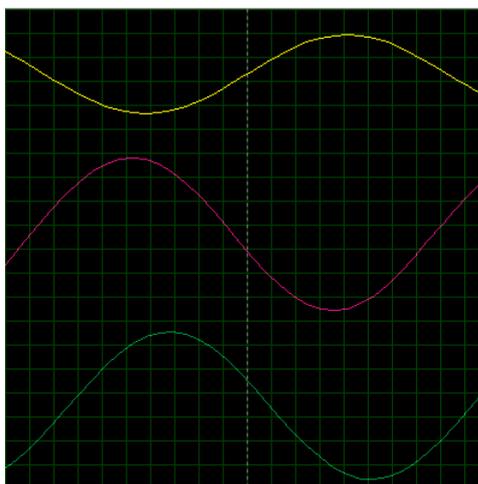


Figura A.16: Respuesta del circuito Filtro, del sensor angular

A.3. Sensores y actuadores

Esquema de simulación del circuito de filtro en la Figura A.15.

En el Resultado de la Simulación se observa el desfase correspondiente (ver Fig. A.16), propia de una señal derivada de posición.

En la Figura A.17 se muestra la placa de filtro de señales análogas provenientes de los sensores de posición, esta fue diseñada en Eagle para la posterior implementación.

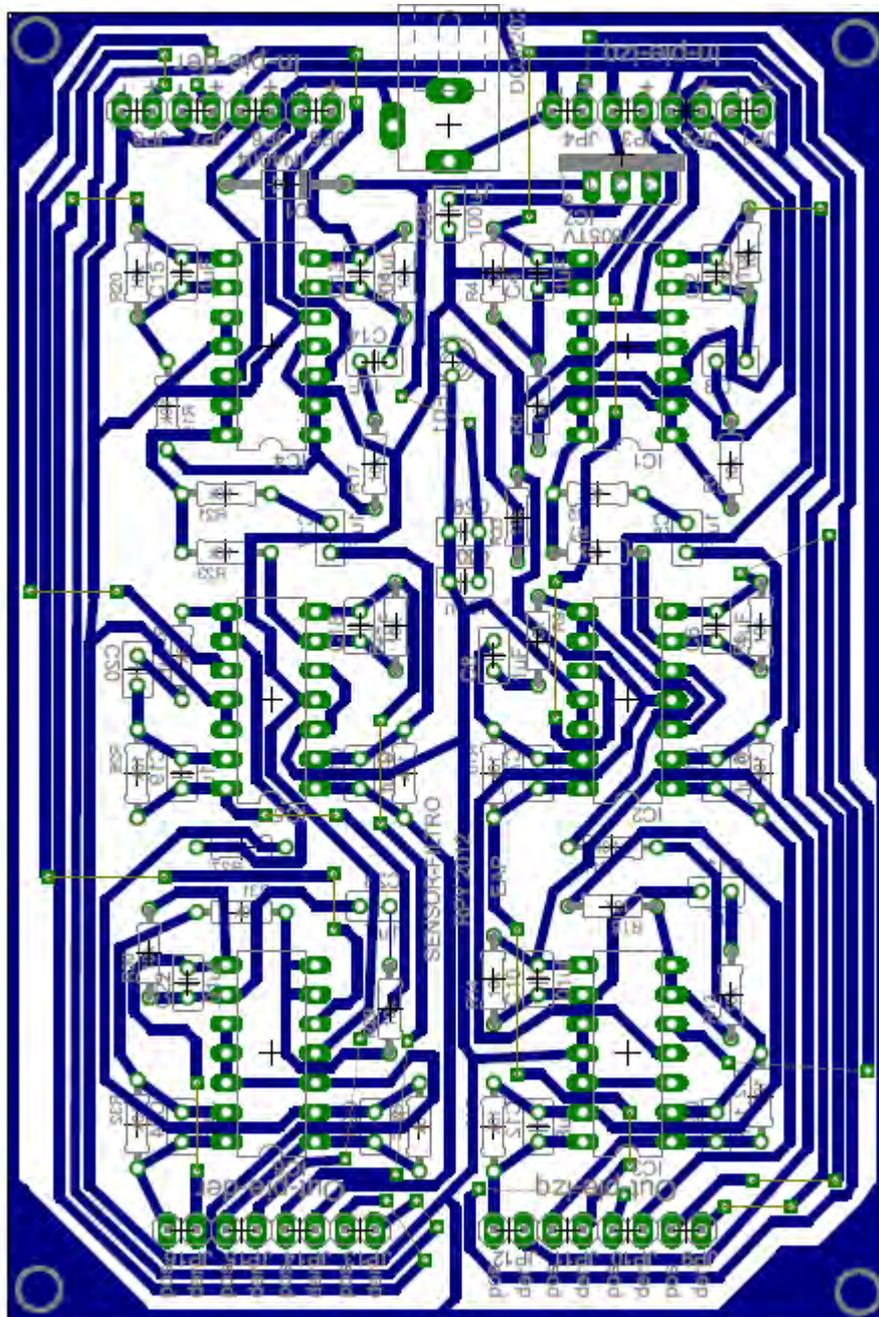


Figura A.17: Diseño de la placa de filtro de señales ADC

APÉNDICE B

Diagramas de simulación

A continuación se muestran las secuencias internas del programa de simulación del robot.

B.1. Simulación del piso

Debido a que nuestro robot bípedo no depende de un sistema de referencia fija, fue necesaria el diseño de simulación del piso, el cual se representa mediante la interacción del pie del robot con un nivel previamente establecido (ver Figura B.1):

La forma en que se simula esta reacción del piso sera a través de cuatro puntos en la parte inferior de la planta del pie, el cual representan un plano de acción (ver Figura B.2).

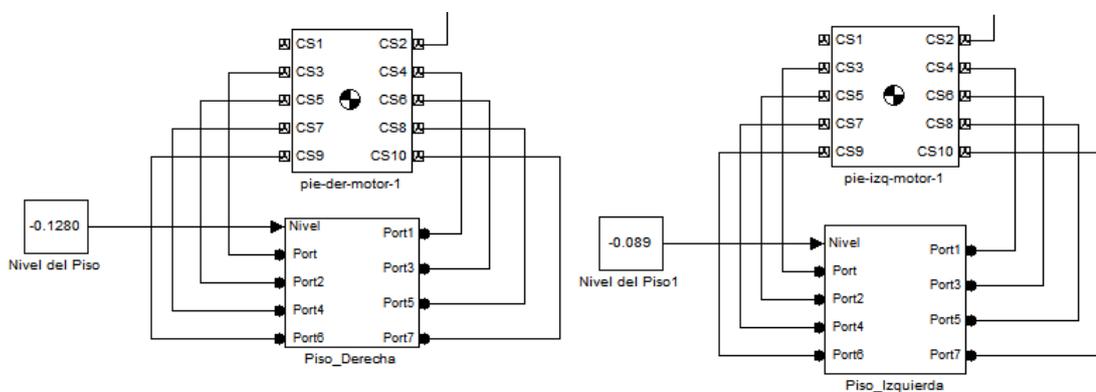


Figura B.1: Diagrama de interacción entre los pies del robot y un nivel de piso

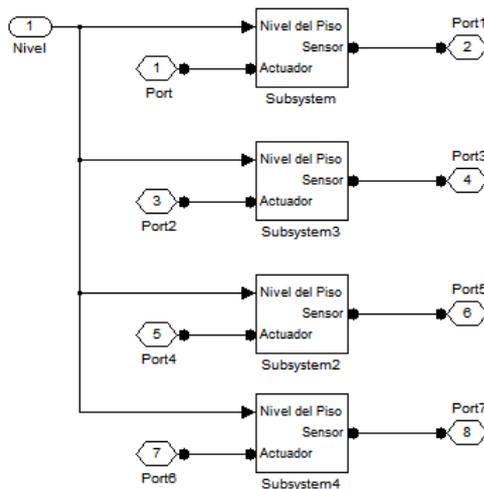


Figura B.2: Definición de la acción en la planta del pie

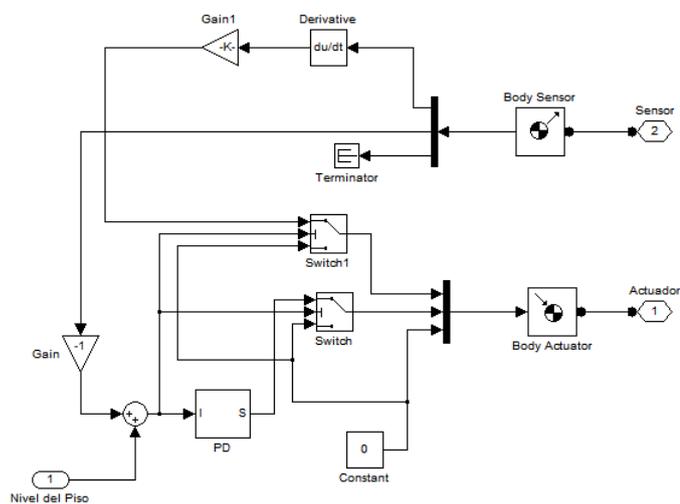


Figura B.3: Controlador simple PID

Para poder obtener una reacción del nivel establecido se diseñó un controlador simple PID para cada punto, el cual tratará de minimizar el rango de error de la fuerza de acción (ver Figura B.3).

B.2. Esquema de la ley de control

En esta sección se muestra la programación en simulink del modelo masa resorte-amortiguador virtual para cada fase, estos se aplicarán de forma independiente en un determinado tiempo.

B.2.1. Parámetros de fase del pie derecho

A continuación se muestran los parámetros de control para cada fase del pie derecho, estos fueron sintonizados de acuerdo a la respuesta de la simulación (ver Figura B.4 hasta B.7).

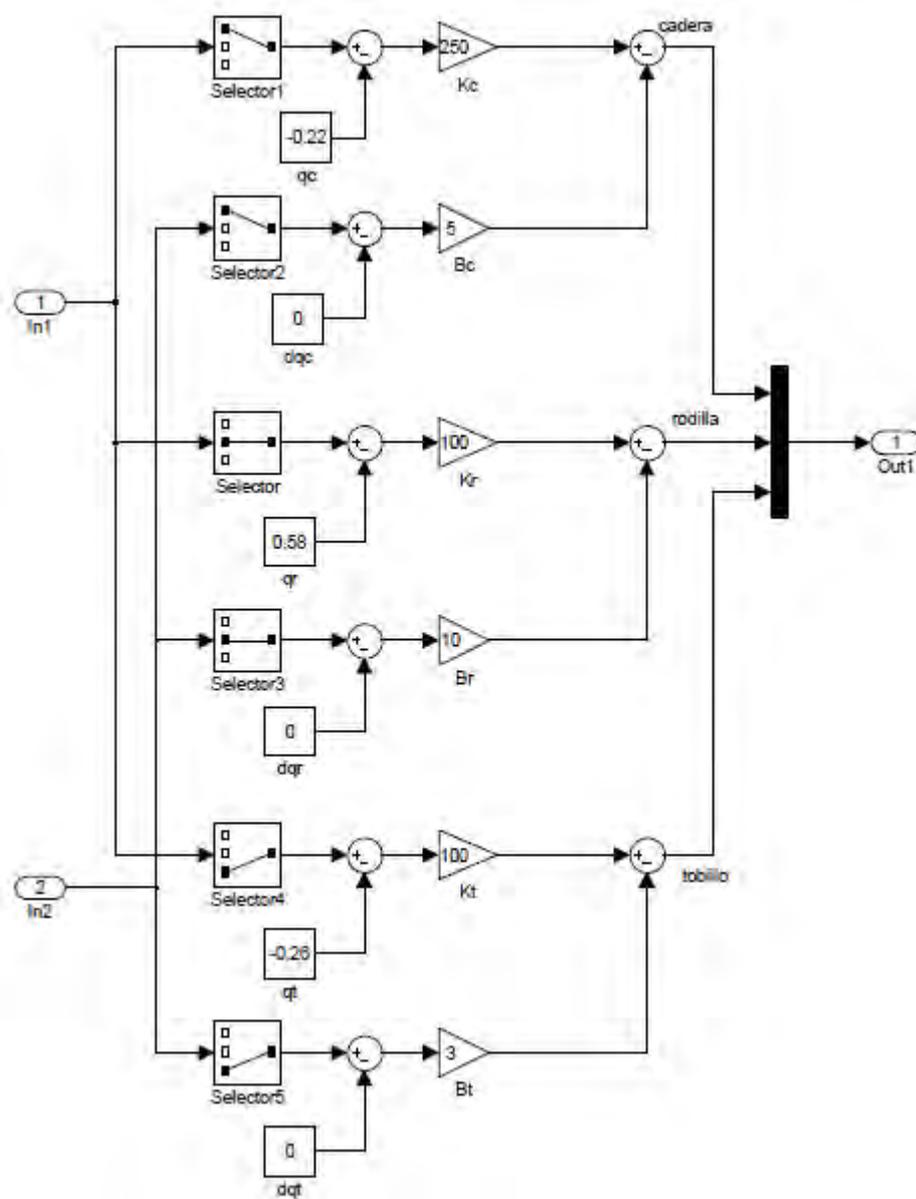


Figura B.4: Parámetros de la fase uno en el pie derecho

B.2.2. Parámetros de fase del pie izquierdo

Parámetros de control de cada fase del pie izquierdo, que también fueron sintonizados de acuerdo a la respuesta del sistema (ver Figura B.8 hasta B.11), cabe resaltar que los eventos de transición funcionan independientemente para cada pierna.

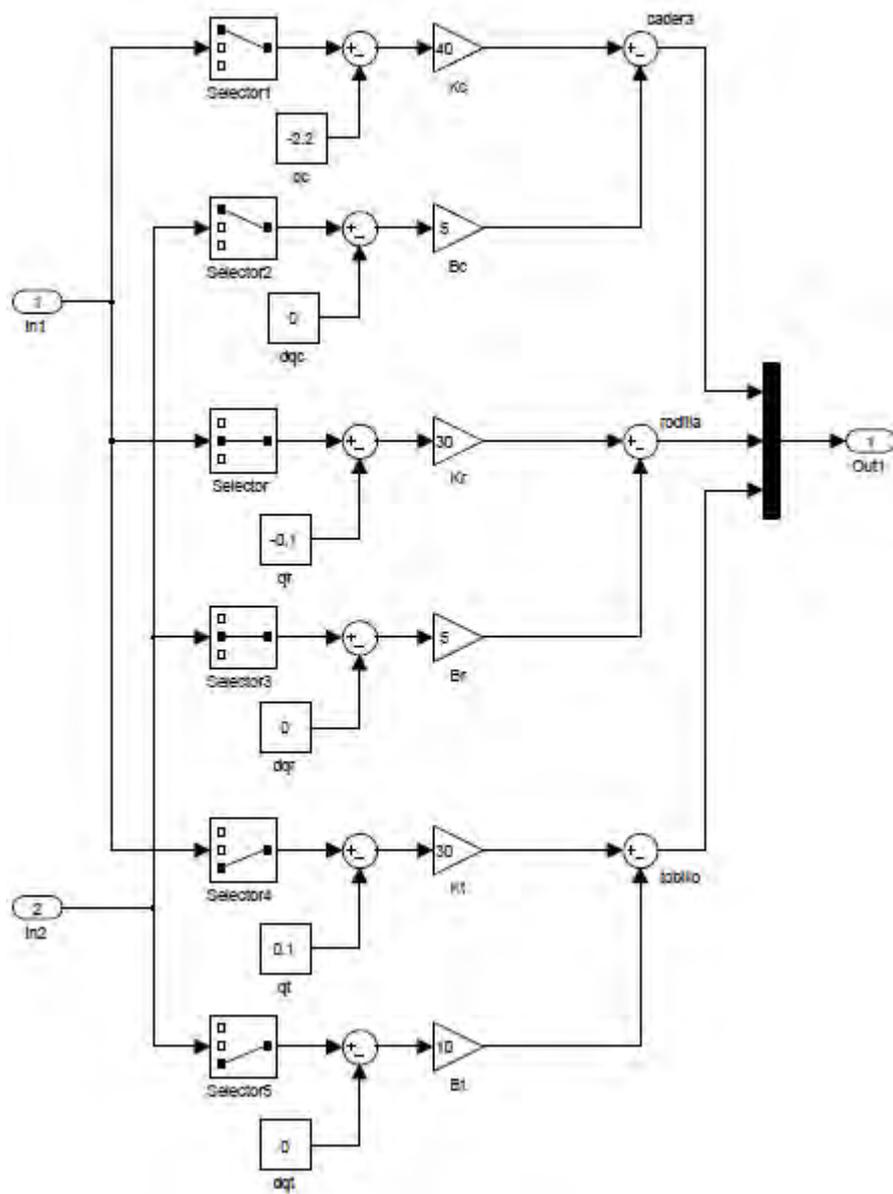


Figura B.5: Parámetros de la fase dos en el pie derecho

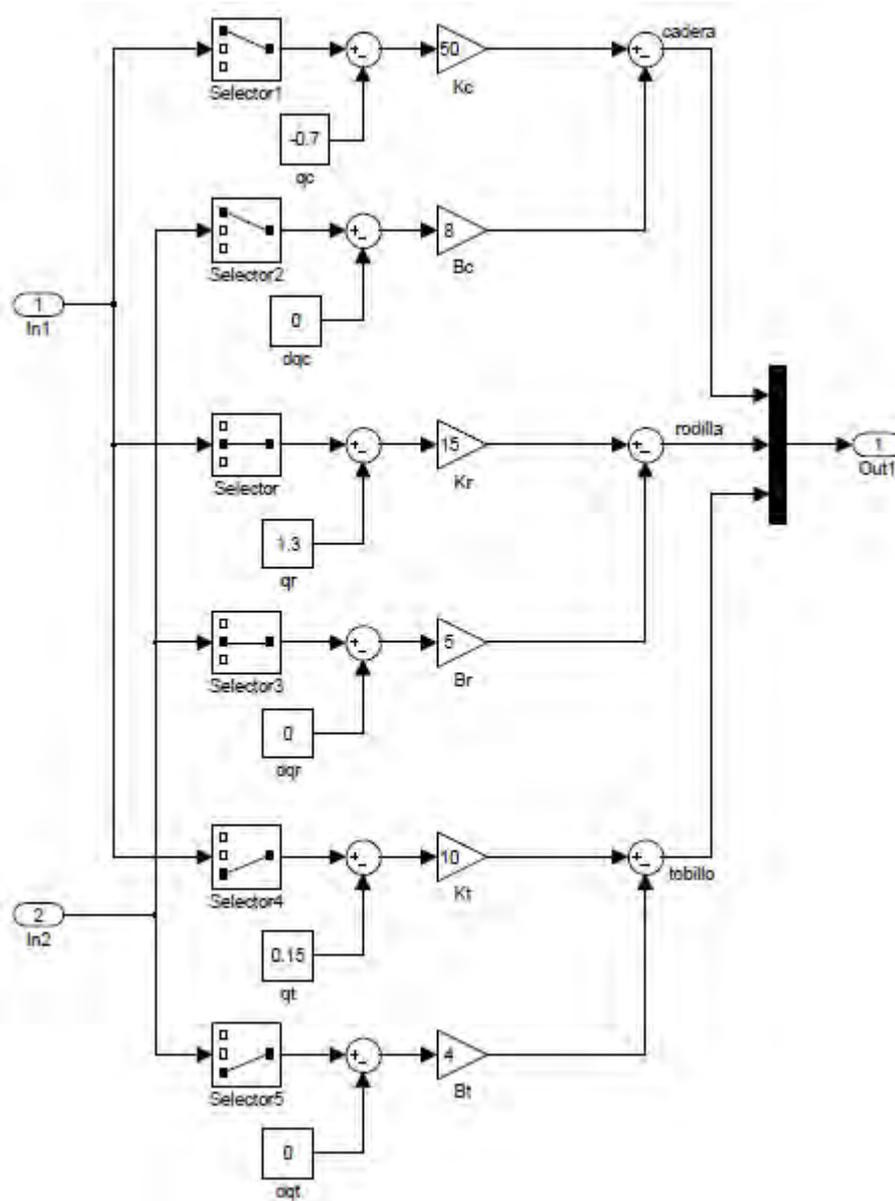


Figura B.6: Parámetros de la fase tres en el pie derecho

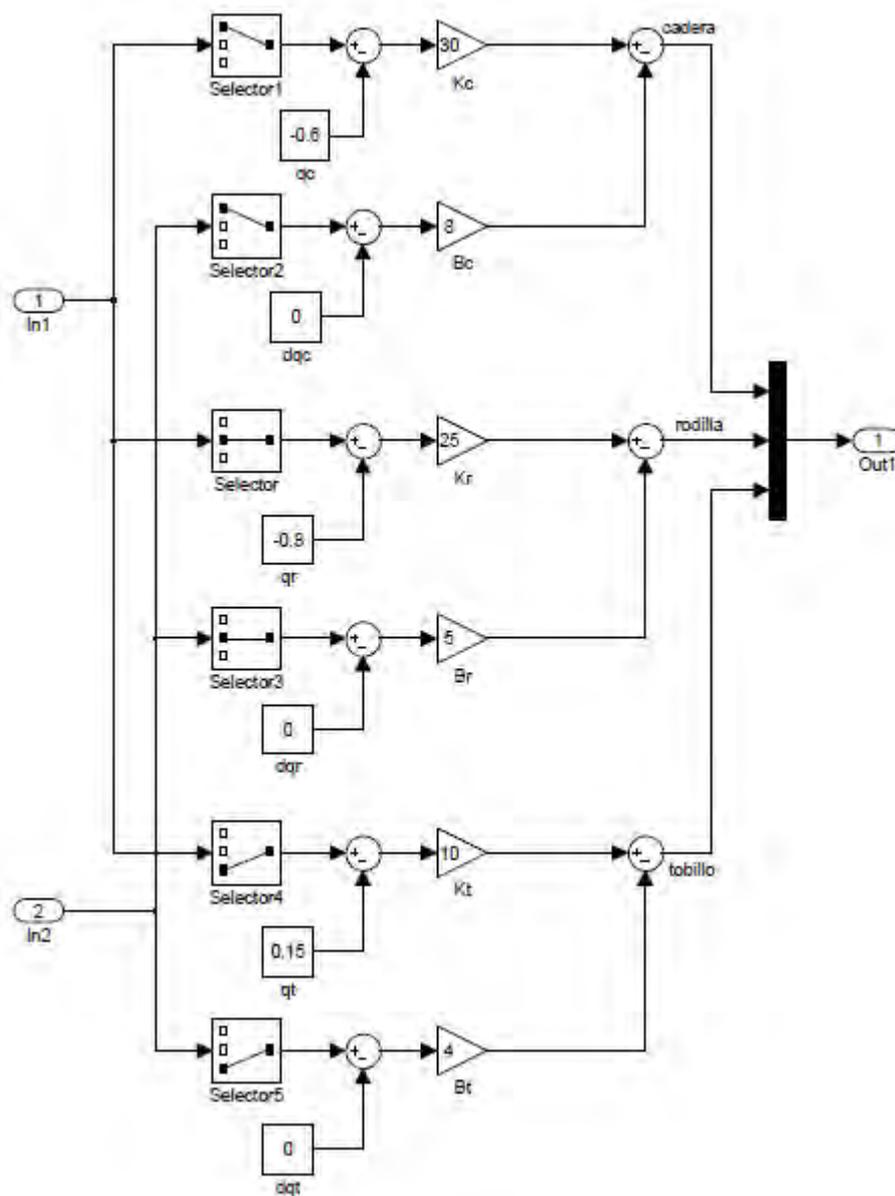


Figura B.7: Parámetros de la fase cuatro en el pie derecho

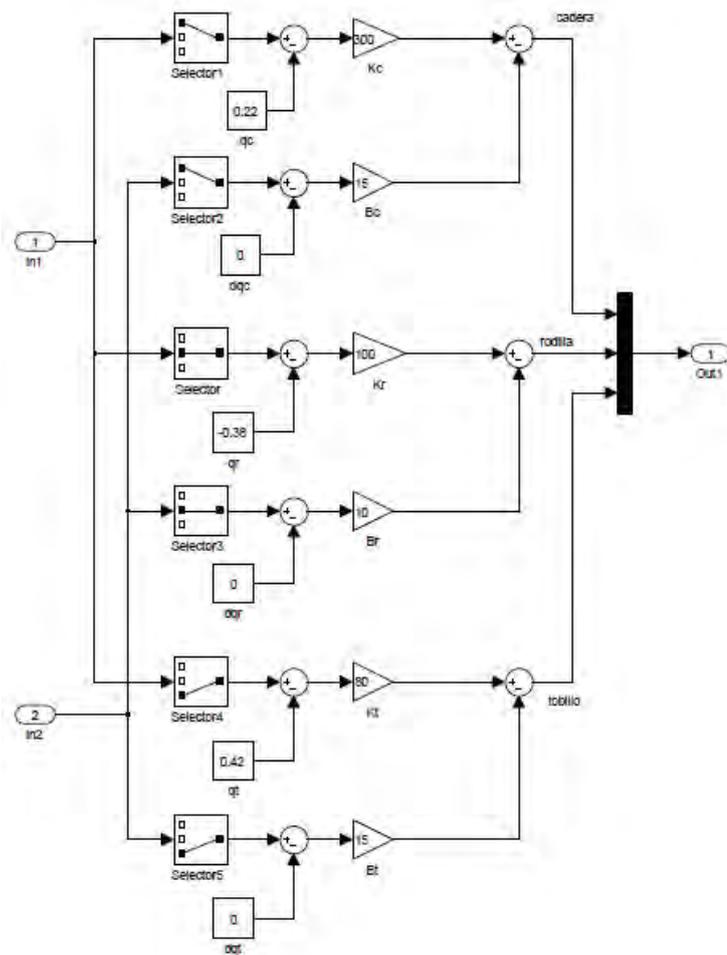


Figura B.8: Parámetros de la fase uno en el pie izquierdo

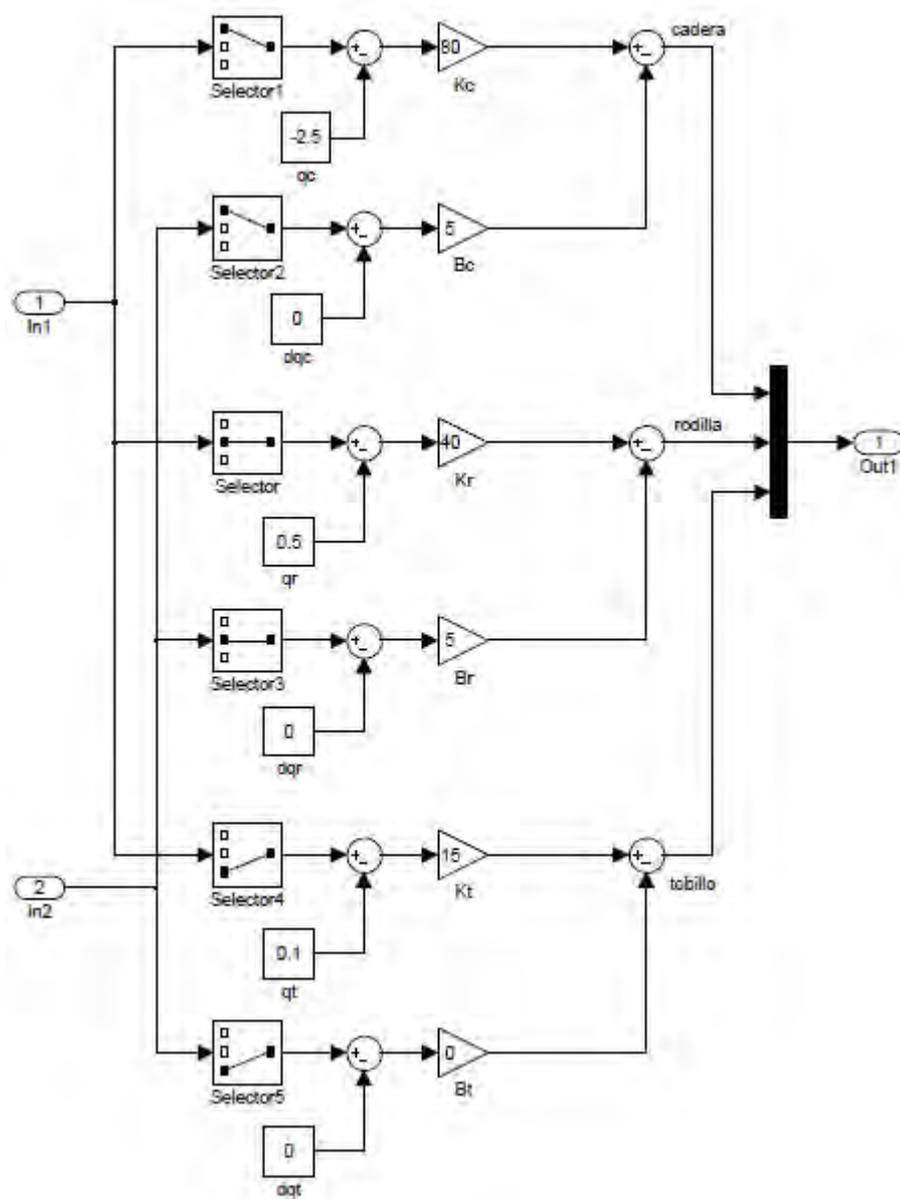


Figura B.9: Parámetros de la fase dos en el pie izquierdo

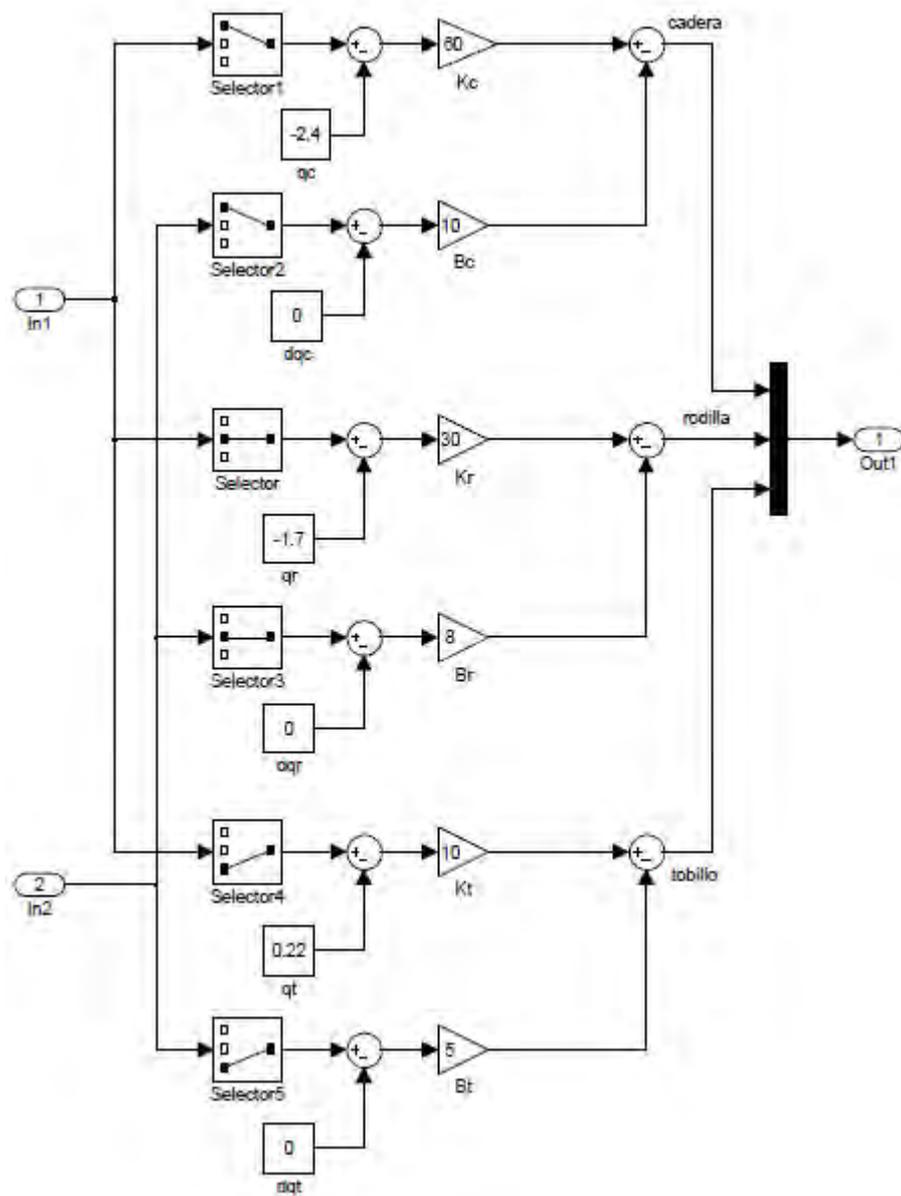


Figura B.10: Parámetros de la fase tres en el pie izquierdo

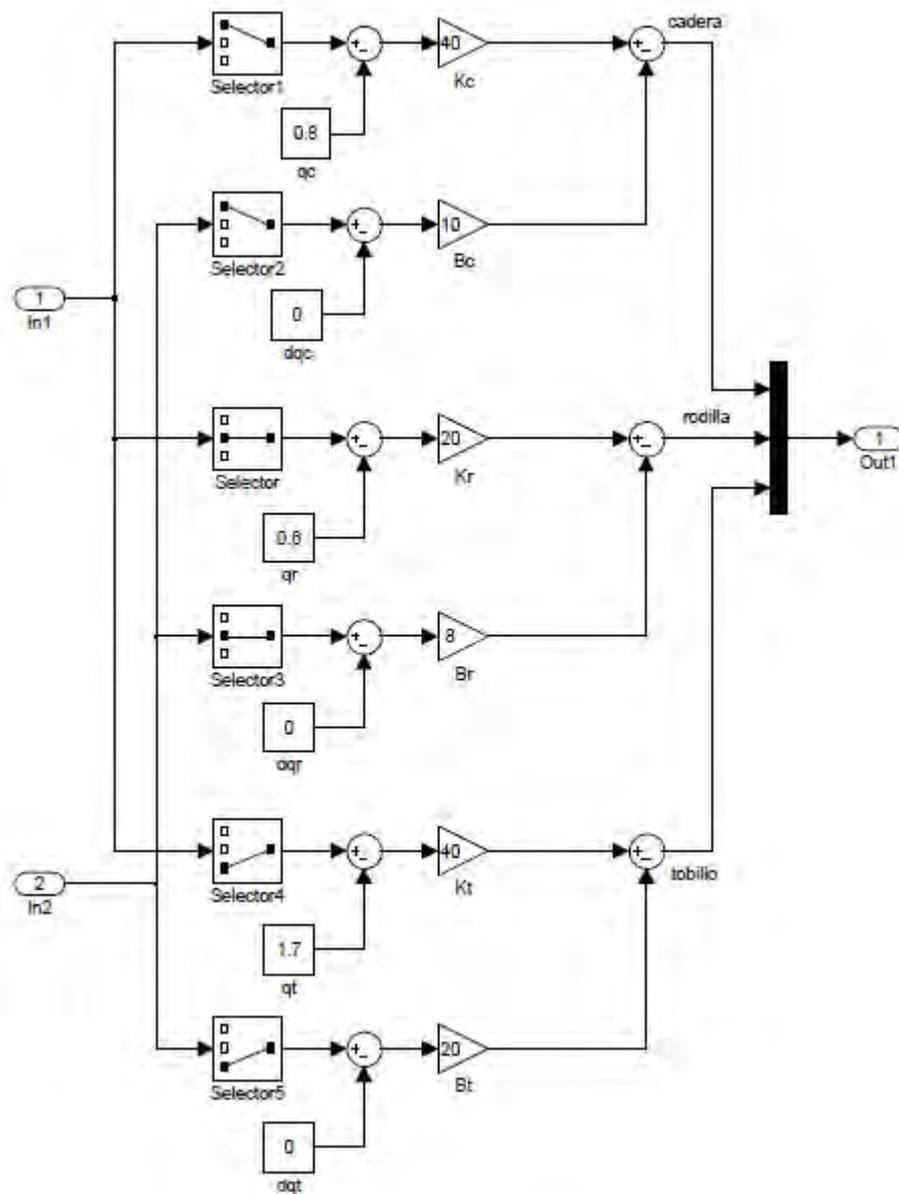


Figura B.11: Parámetros de la fase cuatro en el pie izquierdo