

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN TRAYECTORIAS DE MARCHA OFFLINE PARA EL ROBOT BÍPEDO BIOLOID



Trabajo de Grado de Maestría en Automática

Por:

Ing. Jeison Javier Tacué González

Director:

Ph.D. Carlos Felipe Rengifo Rodas

Codirector:

Ph.D. Diego Alberto Bravo Montenegro

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Maestría en Automática
Popayán, 2018**

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN TRAYECTORIAS DE MARCHA OFFLINE PARA EL ROBOT BÍPEDO BIOLOID

JEISON JAVIER TACUÉ GONZÁLEZ

**Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la Obtención del Título de:**

Magister en Automática

Director:

Ph.D. Carlos Felipe Rengifo Rodas

Codirector:

Ph.D. Diego Alberto Bravo Montenegro

Popayán, 2018



Índice de Contenido

Introducción	10
Organización del Documento	13
Capítulo I: Aspectos Generales del Proyecto.....	13
I.1. Planteamiento del Problema	13
I.2. Objetivos.....	15
I.2.1. Objetivo General.....	15
I.2.2. Objetivos Específicos	15
I.3. Marco Teórico	15
I.3.1. Generalidades	15
I.3.2. Modelado de Locomoción Bípeda.....	18
I.3.3. Control de Marcha Bípeda.....	22
I.3.4. Generación de Trayectorias	24
I.4. Estado de la Técnica.....	25
Capítulo II: Sistema de Medición de Energía	32
II.1. Etapa 1: Fuente de Alimentación.....	34
II.2. Etapa 2: Medición de Corriente.....	35
II.3. Etapa 3: Medición de Voltaje	39
II.4. Etapa 4: Interfaz Gráfica de Usuario y Telemetría.....	40
Capítulo III: Generación de Trayectorias de Marcha Bajo el Modelo Cart-Table y el Indicador de Estabilidad ZMP	45
III.1. Diseño de las Trayectorias para los Extremos de los Pies.....	48
III.2. Diseño de las trayectorias del ZMP	52
III.3. Modelo Cart-Table (cálculo de la trayectoria del CoM)	54
III.4. Solución del Modelo Cart-Table	58



Capítulo IV: Generación de Trayectorias de Marcha Mediante Minimización de Energía Mecánica	66
IV.1. Establecimiento del Índice de Desempeño y las Restricciones Matemáticas de Marcha ⁶⁷	
IV.2. Parametrización de las Trayectorias Articulares de Marcha Mediante Expansión en Series de Fourier	72
IV.3. Solución del Problema de Optimización	72
Capítulo V: Comparación del Consumo de Energía Eléctrica para las Dos Técnicas de Marcha Implementadas	77
V.1. Características de la Experimentación	77
V.2. Análisis de Distribución de Datos de Potencia Eléctrica y Energía Eléctrica	79
V.3. Prueba Estadística No Paramétrica de Wilcoxon.....	86
Capítulo VI: Observaciones	97
Capítulo VII: Conclusiones.....	99
Bibliografía.....	100

Índice de Figuras

Figura 1. Polígono de soporte del robot.	17
Figura 2. Modelo de Péndulo Invertido.....	19
Figura 3. Péndulo Lineal Invertido con actuador prismático y CoM constante.	20
Figura 4. Modelo del 3D LIPM.....	21
Figura 5. Modelo dinámico Cart-Table.	21
Figura 6. Modelo dinámico simplificado Cart-Table.....	27
Figura 7. Diagrama de consecución del sistema de medición propuesto.	33
Figura 8. Sistema electrónico de medición.....	34
Figura 9. Circuito regulador de voltaje. (Tomado notas de clase electrónica básica 2010 Universidad del Cauca)	35



Figura 10. Tamaños y tipos de sensores de corriente. A) Resistivo, B) Transformador de corriente, C) Bobina Rogowski, D) Sensor de estado sólido de efecto Hall. (Imagen tomada de bibliografía [80]).....	36
Figura 11. Esquema básico funcionamiento carga resistiva shunt.	37
Figura 12. Circuito medidor de corriente propuesto.....	38
Figura 13. Divisor resistivo para el medidor de corriente.	39
Figura 14. Circuito propuesto para medir voltaje.....	40
Figura 15. Interfaz gráfica de usuario, sistema de medición y monitoreo del consumo de energía eléctrica del robot Bioloid.....	41
Figura 16. Imagen de ejemplo potencia eléctrica.	42
Figura 17. Representación del segmento Ak método de integración Tustin.....	43
Figura 18. Estructura del generador de patrones de marcha mediante el modelo Cart Table y el criterio de ZMP [66].	45
Figura 19. Representación de la posición inicial de los pies en el plano cartesiano.	48
Figura 20. Trayectoria cartesiana descrita por los pies del robot. En color rojo la trayectoria deseada para el pie derecho, y en color azul la trayectoria deseada para el pie izquierdo del robot.....	50
Figura 21. Trayectoria cartesiana sobre el eje X de ambos pies respecto el tiempo.	51
Figura 22. Trayectoria cartesiana sobre el eje Z de ambos pies respecto el tiempo.....	52
(b)	53
Figura 23. Trayectoria de referencia del ZMP. (a) Diseño con formas triangulares que unen los puntos que deben alcanzar el ZMP. (b) Trayectoria de referencia del ZMP con formas rectangulares y seguimiento del ZMP real [36].....	53
Figura 24. Trayectoria de referencia del ZMP diseñada.	54
Figura 25. Modelo Cart Table propuesto por Shuuji Kajita.	55
Figura 26. Diagrama de fuerzas ejercidas sobre la masa M.	55
Figura 27. Representación del modelo Cart-Table en el espacio.	57
Figura 28. Representación del modelo Cart-Table en el plano frontal y sagital respectivamente [84].....	58
Figura 29. Diagrama de bloques propuesto para la técnica Preview Control.....	59
Figura 30. Esquema de control principal implementado en Simulink de Matlab.	60



Figura 31. Sistema dinámico Cart-Table implementado en Simulink de Matlab.	60
Figura 32. Buffer tipo FIFO implementado en Simulink de Matlab.	61
Figura 33. Trayectorias resultantes del ZMP y CoM para el plano sagital.	61
Figura 34. Trayectorias resultantes del ZMP y CoM para el plano frontal.	62
Figura 35. Disposición articular del robot bípedo Bioloid.	63
Figura 36. Trayectorias articulares de marcha mediante modelo Cart Table y el indicador de estabilidad ZMP.	64
Figura 37. Diagrama de transformación de la energía eléctrica del robot Bioloid.	68
Figura 38. Ubicación del ZMP dentro del polígono de soporte.	70
Figura 39. Trayectorias Articulares de la marcha obtenidas mediante optimización.	75
Figura 41. Captura de datos completa para una prueba de 90 segundos con la técnica Cart Table a velocidad 0.5 m/min.	79
Figura 42. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 0.5 m/min.	81
Figura 43. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 1.0 m/min.	82
Figura 44. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 1.3 m/min.	82
Figura 45. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 0.5 m/min.	83
Figura 46. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 1.0 m/min.	83
Figura 47. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 1.3 m/min.	84



Figura 48. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 0.5m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.	85
Figura 49. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 1.0m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.	85
Figura 50. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 1.3m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.	86
Figura 51. Tratamiento estadístico de datos según su distribución. Imagen tomada de video clases online Universidad de Salamanca [88].	88
Figura 52. Evidencia empirica de la prueba Jarque-Bera basada en asimetria y curtosis. Imagen tomada de material de resumen clases de estadistica.	88
Figura 53. Sub clasificación de datos con distribución no normal [88].	91
Figura 54. Script de Matlab para realizar la prueba de rangos Wilcoxon.	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros de marcha elegidos para la generación de patrones.....	47
Tabla 2. Dimensión de los pies del robot Bioloid.	49
Tabla 3. Índice original $J(\theta)$ en función del número de armónicos para las trayectorias de referencia articular.	75
Tabla 4. Velocidades establecidas para las pruebas de marcha.....	78
Tabla 5. Totalidad de datos adquiridos en la experimentación de este proyecto.	80
Tabla 6. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 0.5m/min.	89
Tabla 7. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 1.0m/min.	90
Tabla 8. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 1.3m/min.	90
Tabla 9. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 0.5m/min.	93



Tabla 10. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 1.0m/min. 94

Tabla 11. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 1.3m/min. 94

Tabla 12. Comparación de las técnicas de generación de marcha usadas en este proyecto. 95



Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi director, admirable profesor y amigo Carlos Felipe Rengifo Rodas, por su dedicación, su paciencia, y su voluntad de compartirme su conocimiento. Gracias por enseñarme este grandioso camino de la ingeniería.

También quiero agradecer al profesor y amigo, Diego Alberto Bravo Montenegro por sus consejos de vida, por la ayuda prestada en este proyecto y sobre todo por su amistad.

Igualmente quiero agradecer a mis padres, Oscar Tacué y Gloria González, por los grandes esfuerzos realizados y la ayuda incondicional en todo lo relacionado con mis estudios.

Asimismo, quiero agradecer a mi mujer Daniela Gallego y a mi hija Mariana Tacué, por todo su amor impulsor, su paciencia y su continua compañía.

Finalmente, pero no menos importante, le agradezco a mis compañeros de la maestría por su amistad y alegrías vividas durante este proceso educativo.



Introducción

El tema de estudio de algunos investigadores en robótica consiste en diseñar y construir robots que se parezcan a los seres humanos, tanto en su comportamiento, como en su apariencia física y hasta en su forma del caminar. Por su parte la marcha humana es un proceso de locomoción natural, flexible y perfectamente adaptable a cualquier terreno [1], pero al mismo tiempo su ejecución es inconsciente para los seres humanos, que al ejecutarla no percibimos todo lo que esto implica para el organismo, el cual debe coordinar el movimiento de los músculos de las piernas con la información proveniente del sistema vestibular y así mantener el cuerpo en equilibrio mientras este se desplaza a diferentes velocidades y sobre diversos terrenos, además de garantizar bajo consumo de energía. En la marcha humana el cuerpo regula el proceso de desplazamiento para que este sea lo más eficiente posible. En general un robot humanoide con locomoción bípeda, es un modelo simplificado de las piernas del hombre, por lo tanto, hay grados de libertad que no se consideran. Esto sugiere inmediatamente que cualquier robot bípedo con ciertos grados de libertad podría caminar sin perder estabilidad, sin embargo lo hará con menor eficiencia que un hombre, como resultado de esto los actuadores del robot harán un mayor esfuerzo mecánico que a su vez se traduce en mayor gasto de energía [2].

La mayoría de investigaciones y desarrollos de las últimas décadas acerca de robots bípedos se han enfocado en ampliar la funcionalidad de movimientos y prestaciones de las diferentes extremidades, mediante la adición de nuevas articulaciones o de mecanismos sub-actuados, lo cual demuestra la evolución en términos de la versatilidad de estas máquinas, esto es fácilmente comprobable dado que los mejores robots de nuestros días pueden caminar, girar, subir o bajar escaleras, como es el caso de; ASIMO [3] [4], HRP [5] [6] [7], Nao [8] [9], HUBO [10], ATLAS [11] [12], entre otros. Como resultado, la mayoría de estos robots han solucionado en gran proporción el problema de la versatilidad de movimientos, pero de igual forma esto aumenta el consumo energético, que a su vez limita al robot y se traduce en reducción del tiempo de operación y baja capacidad para transportar cargas, así mismo su independencia se ve afectada. Dicho de otra manera, el consumo energético se contrapone a la versatilidad del robot [13]. Una visión más amplia se ilustra partiendo de la siguiente clasificación general; existen robots que utilizan técnicas



de marcha basadas en la dinámica pasiva de su estructura y un terreno inclinado para desplazarse, lo cual indica que sus articulaciones no poseen ningún tipo de dispositivo que consuma energía, y únicamente son impulsadas por la acción de la gravedad ejercida sobre el propio centro de masa del robot, así pues su gasto energético es cero y su versatilidad de movimientos es baja [14] [15]. Como es de imaginar los robots pasivos utilizan a su favor el impulso generado por el balanceo pendular de los pies, este mismo fenómeno es usado en la marcha humana otorgando fluidez al movimiento y mayor eficiencia en términos de energía. Por el contrario existen robots con articulaciones activas que incluyen motores y aumentan la versatilidad de movimientos, pero su problema se encuentra en el excesivo consumo de energía derivado de los requerimientos de electricidad o alguna otra forma de suministro energético [13] [16].

En cuanto al modelado matemático y el control de marcha para robots bípedos existen dos enfoques generales. El primero, requiere del conocimiento preciso de la dinámica multicuerpos del robot, incluyendo masas, centros de masa e inercias de los actuadores, normalmente es llamado enfoque basado en dinámica o enfoque de dinámica inversa (ID), en consecuencia, su principal desventaja está en la complejidad de obtención del modelo dinámico del robot y a la vez usarlo para el cálculo en línea de algoritmos de control durante el ciclo de marcha debido a su elevada carga computacional. El segundo es conocido como enfoque basado en modelos y cinemática inversa (IK), este a diferencia del anterior no requiere conocimiento del modelo dinámico del bípedo y en su lugar utiliza en gran parte las propiedades geométricas y cinemáticas del robot, para crear un modelo dinámico aproximado, el cual se conoce como modelo simplificado y es adecuado para el control y generación de marcha [17] [18]. Por otra parte, la generación de trayectorias de marcha busca definir las funciones matemáticas que establecen la posición, velocidad y aceleración de cada articulación durante el desplazamiento del robot bípedo respecto a un marco de referencia. La generación de trayectorias para un robot puede hacerse de dos formas [19], estas son:

- ✓ Cálculo y posterior procesamiento de trayectorias (Off Line).
- ✓ Cálculo y procesamiento al instante de trayectorias (On Line).

No obstante, la generación de trayectorias de referencia de marcha, hace parte de un problema más general: el control conjunto y sincronizado de los numerosos actuadores que



intervienen en el desplazamiento del robot. Normalmente la generación de trayectorias de marcha para robots bípedos posee tres enfoques generales de abordaje, un enfoque clásico, en que se establecen las trayectorias de los extremos de los pies junto y la del centro de masa del robot (CoM) para un ciclo de marcha estable, enseguida mediante cinemática inversa se calculan para cada instante las posiciones angulares de cada junta, su desventaja está en el elevado costo computacional de resolver al modelo inverso. También existe el método de tablas de control en el cual se establecen una matriz compuesta por vectores de posición que han sido calculados previamente para cada articulación, su problema es la flexibilidad a la hora de realizar cambios en los parámetros en la marcha, pues esto implica recalcular toda la matriz [20]. El tercer enfoque es el bioinspirado, cuyos patrones de posición se obtienen a partir de modelos provenientes de la naturaleza, comúnmente conocidos como generadores centrales de patrones (CPG's) y están basados en inteligencia artificial, normalmente son grupos de neuronas que producen un ritmo de movimiento muscular que se puede adoptar a la marcha de robots bípedos [21].

Globalmente el desarrollo de este proyecto muestra el estudio comparativo en términos de consumo de energía eléctrica de dos métodos de generación de trayectorias de marcha; el primero de ellos utiliza un enfoque basado en modelos simplificados y la cinemática inversa, mientras que el otro se basa en la minimización de la energía mecánica para lo cual utiliza el modelo dinámico real del robot. Las dos técnicas se calculan de forma off line, y se implementan en el robot bípedo Bioloid para diferentes parámetros de marcha, posteriormente se realizan pruebas de marcha en laboratorio para obtener datos reales de consumo energético que puedan discutirse en términos de versatilidad, consumo energético, complejidad de cálculo matemático y calidad de marcha.



Organización del Documento

Capítulo I: Aspectos Generales del Proyecto

I.1. Planteamiento del Problema

Respecto al estado actual de las investigaciones en robots humanoides, inicialmente se debe destacar que la locomoción bípeda y estable aún no está resuelta en su totalidad. Tampoco existen robots humanoides de tamaño y forma humana en el mercado, debido a que la dificultad de la locomoción bípeda y estable crece de manera exponencial conforme aumenta la altura y el peso del robot bípedo, concretamente en nuestros días predominan los robots pequeños, debido a que de bajo costo y fáciles de controlar [22].

Uno de los inconvenientes consiste el cálculo de las funciones matemáticas que sincronicen los movimientos de cada articulación del robot para generar un ciclo de marcha estable, con suficiente robustez y flexibilidad al igual que los humanos. Lo anterior muestra que la locomoción de los bípedos sigue siendo un problema abierto a discusión que está lejos de la flexibilidad, robustez y plasticidad de los movimientos naturales de las personas [21] [23], adicionalmente a esta noción se debe considerar la tediosa tarea del modelado matemático de los robots bípedos, a partir de la cual se calculan los patrones de marcha y los algoritmos de control del robot. La otra dificultad igualmente significativa de los robots bípedos reside en el aumento de la eficiencia energética, por lo cual se debe considerar la relación del consumo energético respecto a la versatilidad de movimientos que posee un robot humanoide [13].

En la actualidad es común encontrar en la literatura dos enfoques para abordar la generación de trayectorias de marcha en robots bípedos. El primero basado en la minimización de la energía gastada por el robot, el cual requiere el conocimiento preciso de la dinámica del robot. Esto incluye masas, inercias, centros de masa, fricciones secas y viscosas. El segundo enfoque no requiere del modelo dinámico del bípedo y en su lugar utiliza sistemas dinámicos similares en balanceo además de parámetros geométricos y la masa total del robot usada de forma puntual, normalmente estas técnicas son usadas por robots japoneses [24] [18] [21] [25].



En el caso del primer enfoque de generación existen dos índices de desempeño a minimizar. El primero de ellos es la integral con respecto al tiempo del cuadrado de la suma de los *torques* aplicados a las articulaciones [26] [27]. Solo en el caso de que pueda garantizarse una relación lineal entre la corriente de armadura de los motores que accionan el robot y el par que estos generan, este índice se podrá considerar proporcional a las pérdidas por efecto *Joule* (calentamiento del bobinado). El segundo índice es la integral con respecto al tiempo del valor absoluto del producto punto entre el vector de *torques* y el de velocidades articulares [28]. Esta medida es la integral del valor absoluto de la potencia mecánica ejercida por las articulaciones del robot [29]. Los anteriores índices, como lo evidencia su formulación, no toman en cuenta la dinámica de los actuadores del robot [30] [31] [32]. Otros trabajos como en [33] y [34] incluyen modelos matemáticos de los actuadores, aunque desconocen la existencia de fenómenos como fricciones secas o la saturación de la relación entre el flujo magnético y corriente de armadura.

La principal limitante asociada a la generación de trayectorias basadas en optimización es que no puede garantizarse que la solución encontrada corresponda a un mínimo global. Esto conlleva a que trayectorias presentadas como óptimas en algunos trabajos como [35] podrían ser en realidad solo sub-óptimas. Aún en el caso de que pudiese garantizarse la convergencia a un mínimo global, no podría saberse con certeza cuán óptima es la trayectoria resultante cuando está se implementa en un robot real cuya dinámica es levemente diferente a la del modelo utilizado para resolver computacionalmente el problema de optimización.

También es importante resaltar que el consumo de energía eléctrica de trayectorias generadas mediante optimización no ha sido comparado respecto a técnicas de generación de marcha que usan modelos simplificados del robot, como las propuestas por *Kajita* [36]. De lo anterior surge el interrogante ¿Conlleva la enorme complejidad asociada a la generación de trayectorias basadas en optimización a un consumo de energía eléctrica significativamente menor con respecto al de la técnica basada en el punto de momento cero (ZMP)?



I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo del consumo de energía eléctrica del Robot Bioloid Premium Kit, para trayectorias de marcha bípeda Offline, generadas mediante la técnica de minimización del consumo de energía mecánica, y el generador de patrones de marcha basado en el modelo *Cart-Table* propuesto por Kajita.

I.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Proponer un sistema inalámbrico de medición y monitoreo del consumo de energía eléctrica para el Robot Bioloid Premium Kit.
- ✓ Implementar diferentes patrones de marcha para el Robot Bioloid Premium Kit a partir de dos tipos de generadores de trayectorias; el primero fundamentado en la minimización del consumo de energía mecánica, y el segundo basado en el modelo *Cart-Table* propuesto por Kajita.
- ✓ Determinar el consumo de energía eléctrica del Robot Bioloid Premium Kit para las dos técnicas de generación de marcha bípeda implementadas, considerando distintas velocidades de marcha.

I.3. Marco Teórico

I.3.1. Generalidades

En esta sección se presentan algunas nociones básicas para abordar la robótica de humanoides; el modelado, el control y la generación de trayectorias de marcha bípeda.

¿Porque investigar Acerca de Robots Humanoides?

Es vital saber cuál es la importancia de las investigaciones en robots bípedos, según [24] la motivación se debe a tres aspectos; científicos, tecnológicos y económicos.

En el campo científico siempre es necesario realizar estudios que permitan entender el cuerpo humano y su gran capacidad de movimientos, de lo cual se pueden obtener modelos e hipótesis que generen conocimientos que puedan ser aplicados en la rehabilitación de personas con discapacidad al caminar, también se piensa en diseñar y mejorar cada día al



robot humanoide hasta que posea la misma robustez de movimientos del cuerpo humano [24] [37].

A nivel tecnológico es posible construir nuevas y mejoradas prótesis, aunque por ahora no hay un vínculo directo entre la investigación de prótesis con la robótica de bípedos, sin embargo se cree que en el futuro se deberá aunar esfuerzos para dar un gran paso en esta área [38]. También es posible desarrollar nuevas técnicas de inteligencia artificial asociadas a la visión de máquina, el tacto y otros sensores, puesto que esta clase de robots servirá como banco de pruebas. De igual manera estos robots pueden ser utilizados en la educación, ya que existe gran interés de los jóvenes por la RoboCup [39], FIRA Robot Soccer competitions [40], la cual tiene como objetivo competir contra los campeones de la Copa Mundial de la FIFA del año 2050.

A nivel económico, es frecuente pensar que podrán venderse para el servicio doméstico, la seguridad, el acompañamiento de niños y ancianos, para muchas tareas del sector industrial, en el campo militar, la exploración, la búsqueda y el rescate [24] [37] [40].

Ciclo de Marcha Bípeda

De acuerdo con [41] [42] y [43], básicamente existen dos clasificaciones para la marcha bípeda, el caminado con equilibrio estático y el caminado con equilibrio dinámico. En el primero la proyección vertical del CoM siempre se encuentra dentro del polígono de soporte del robot y generalmente estos robots utilizan pies grandes y algoritmos de control sencillos, mientras que en el segundo, el caminado con equilibrio dinámico, existen momentos en los que el CoM abandona el polígono de soporte, esta es precisamente la forma de caminar de los humanos, que poseen pies pequeños, flexibles y un CoM ubicado lejos del suelo comparado con su estatura, esto muestra que los algoritmos de control de estos robots deben ser altamente eficientes y sofisticados. Es aquí donde nacen los retos para la investigación de la marcha humana implementada en robot bípedos.

En general la marcha es un método particular de locomoción bípeda, la cual se realiza con la repetición de movimientos alternantes entre los miembros inferiores del sistema bípedo, denominados ciclos de marcha, cuyo objetivo es realizar el desplazamiento del individuo. Durante cada ciclo de marcha el cuerpo se desplaza una longitud equivalente a la distancia longitudinal entre los talones del pie. Específicamente la marcha humana se caracteriza por poseer cuatro fases [37]:

-Fase de doble soporte: donde ambos pies se encuentran completamente apoyados sobre el suelo.

-Fase de previa de oscilación: en esta fase el talón del pie de arranque se encuentra elevado del suelo, mientras que sus dedos están apoyados sobre el suelo.

-Fase de simple soporte: en esta fase uno de los pies se encuentra completamente apoyado sobre el suelo mientras que el otro oscila libremente hacia adelante.

-Fase posterior al simple soporte: en esta fase el bípedo se encuentra en doble soporte y sucede cuando el pie oscilante de avance toca el suelo con el talón.

Centro de Masa CoM y Centro de Presiones CoP

El CoM o centro de masa del robot, es el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él, estuviera aplicada la fuerza resultante de todas las fuerzas que inciden en el cuerpo del robot [44] [45]. El centro de presiones CoP, es un punto de la superficie de contacto del pie del robot con el suelo, en donde se considera actúa la fuerza neta de la reacción contra el piso del robot [41] [45].

Polígono de Soporte

El polígono soporte es la delimitación geométrica generada por el contacto de los puntos de apoyo del robot con el suelo, formando un polígono por uno o por ambos pies del bípedo, de acuerdo a la fase de marcha en que este se encuentre. Según [41] la importancia de esta área radica en el siguiente criterio: “si el CoM del robot se proyecta sobre el suelo y esta proyección a su vez se encuentra dentro del polígono formado por los pies del bípedo, se puede afirmar que la postura del robot en ese instante es estable, en caso contrario la postura será inestable y el robot perderá equilibrio fácilmente”.

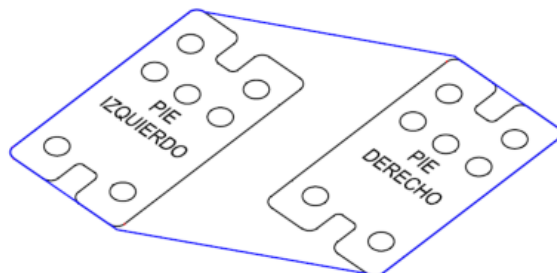


Figura 1. Polígono de soporte del robot.



ZMP (Zero Moment Point)

En la locomoción bípeda el ZMP es uno de los términos más famosos y usados, originalmente fue propuesto por M. Vukobratovic en 1972 [46]. Según esta teoría existe un punto P específico, donde el momento que genera la fuerza de reacción del piso en los pies compensa al momento total que genera el cuerpo del bípedo en su caminata, a este se le conoce como Punto de Momento Cero (ZMP). Este existe solo dentro del polígono de soporte e indica qué tan estable se encuentra el robot en un determinado instante de la caminata. Este parámetro es de suma importancia a la hora de diseñar estrategias de control y generación de patrones de marcha para robots bípedos, debido a que sirve como indicador de estabilidad [37] [46].

I.3.2. Modelado de Locomoción Bípeda

Para efectuar el control del equilibrio del robot, es indispensable contar con la representación matemática de los diversos movimientos que el robot pueda efectuar al caminar, y posteriormente conseguir las posiciones articulares de las piernas en cada instante de tiempo para alcanzar un objetivo de referencia de marcha, bien sea la consigna del CoM del robot o de sus pies [42] [38] [47].

En realidad, el modelo dinámico de un robot bípedo contiene elementos continuos y discretos, que conmutan entre las diferentes fases de marcha. Por su parte los elementos continuos están asociados a la cadena cinemática del robot, mientras que los elementos discretos están relacionados a las fuerzas de contacto y al despegue del pie [42] [27].

Sin embargo existen proyectos como en [12], donde se ha implementado un controlador para el robot ATLAS basado en ID (Dinámica Inversa), pero al mismo tiempo se adicionó un algoritmo previo fundamentado en IK (Cinemática Inversa) para compensar los errores en la obtención del modelo dinámico.

En la actualidad hay muchos y variados estudios de modelos de locomoción bípeda que se han realizado, sin embargo este documento presenta algunos de los más representativos en orden de complejidad [24] [48].

Modelos simples de Locomoción, Aproximación Dinámica

Esta clase de modelos a pesar de su sencillez permiten entender las fases del ciclo de marcha, especialmente el movimiento del centro de masa y de los pies del robot. Su representación dinámica se realiza a partir del planteamiento de ecuaciones Newton-Euler

para sistemas físicos, y su principal característica es el uso de masas puntuales para representar el CoM y el CoP del robot, despreciando las masas de las piernas y otros cuerpos.

Modelo de Péndulo Invertido. Quizás es la representación más sencilla de la pierna, fue introducida por Kajita y Tani en 1991 [32], ver figura 2, mediante un péndulo invertido que desprecia la masa de los eslabones que componen las piernas. Donde una masa puntual en el extremo superior del péndulo es el CoM del robot y el pivote CoP es el centro de presión de las fuerzas que actúan sobre la planta del pie. Este modelo posee tres fases fundamentales; una de desaceleración, cuando el CoM se encuentra por detrás del CoP, luego el cenit cuando el CoM y CoP están frente a frente listos para iniciar el empuje para dar el paso siguiente y finalmente la fase de aceleración cuando el CoM esta delante del CoP, que además permite establecer la longitud de la zancada. La ventaja de este modelo es su simplicidad, pero presenta la desventaja de incorporar la dinámica no lineal debida a la inclusión de la función trigonométrica seno, lo que restringe algunas técnicas de control [49] [38].

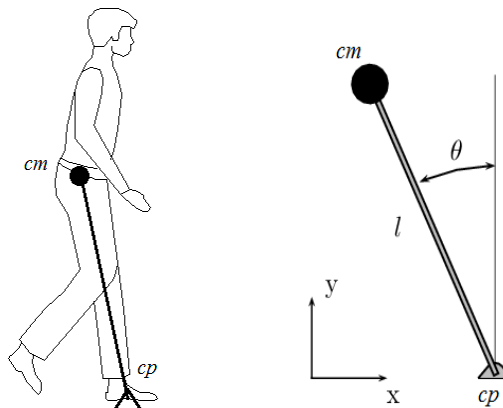


Figura 2. Modelo de Péndulo Invertido.

Modelo Lineal de Péndulo Invertido LIPM. Esta representación fue introducida por primera vez por Kajita y Tani en 1996 [50], y también se basa en el péndulo invertido, sin embargo para modelar la elasticidad de la pierna y eliminar la no linealidad del péndulo anterior se aumenta un actuador prismático, que permite al péndulo estirarse o encogerse, de tal forma que el centro de masa se restringe a un plano horizontal de altura constante [51]. Ver figura 3.

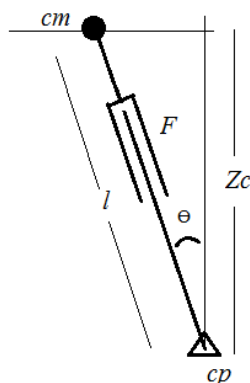


Figura 3. Péndulo Lineal Invertido con actuador prismático y CoM constante.

Otros métodos basados en identificación de sistemas dinámicos intentan mejorar la exactitud de los modelos simples comparados con los modelos dinámicos multi cuerpos. Por ejemplo en [52] los autores proponen utilizar una representación de segundo orden en espacio de estados para mejorar el modelo de péndulo invertido, además permite utilizar algoritmos de control online y offline para la generación de patrones de marcha.

Modelo Lineal de Péndulo Invertido 3D. Si la dinámica del péndulo con actuador se analiza en el espacio tridimensional, se obtiene el sistema Péndulo Invertido Lineal 3D [53]. Este posee muchas posibilidades de movimiento, sin embargo, es necesario restringir el CoM a un plano Z_c , ver figura 4, que elimine las no linealidades del modelo. En seguida la representación de movimientos de marcha se obtiene a partir las relaciones en los planos (x,z) y (y,z) . Este modelo además permite calcular la fuerza necesaria para equilibrar el peso del CoM del robot y de esta forma corregir los momentos que conllevan a pérdidas del equilibrio, finalmente se puede crear una estrategia de control que calcula el punto en donde las fuerzas de reacción del pie contra el suelo sean cero, esto es hallar el indicador ZMP de estabilidad, de manera que el robot no tendrá aceleraciones que conlleven a su caída [54] [55].

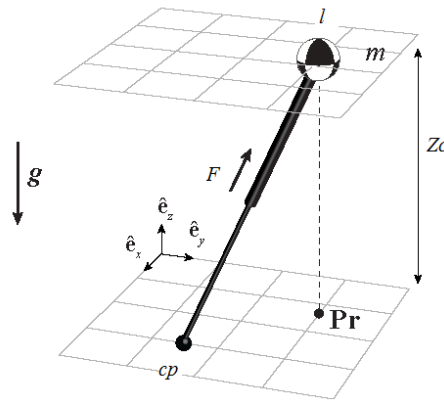


Figura 4. Modelo del 3D LIPM.

Modelo Cart-Table. En este modelo el centro de masa CoM del robot se representa mediante un bloque móvil (carro) que se desplaza sobre una mesa y la base de esta mesa representa el pie del robot. El propósito de este modelo consiste en calcular el punto p sobre el suelo en cual el momento total es cero o el indicador de estabilidad ZMP, en el cual la sumatoria de torques debidas a las fuerzas de reacción del suelo contra el pie sea nula [36]. Este modelo da un acercamiento sencillo e intuitivo a las técnicas de generación de marcha bípeda mediante control de ZMP, al darle movimiento al carro como si fuese la trayectoria deseada del CoM del robot y luego hallar el punto ZMP para cada pareja (Px, Py), donde Px y Py son las coordenadas que ubican el ZMP sobre el suelo que no permitirá que el robot se inestabilice [39] [26] [39]. Se necesitan dos modelos Cart-Table para cada pierna, uno para el plano sagital (x,z) y otro para el plano frontal (y,z).

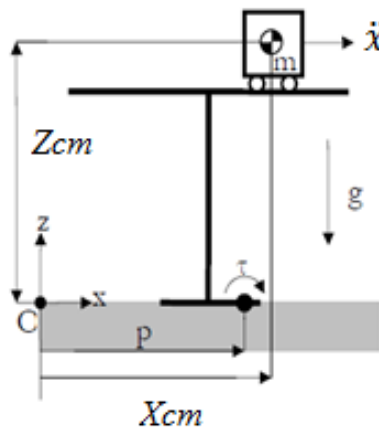


Figura 5. Modelo dinámico Cart-Table.



Modelos dinámicos de n eslabones

En esta técnica de modelado, los elementos que componen las piernas del robot y otras cadenas articulares se representan como cuerpos rígidos (eslabones) distribuidos, con un centro de gravedad y un momento de inercia. La complejidad del modelo depende de la cantidad de eslabones que el diseñador considere necesarios para representar al robot.

Modelo de doble eslabón. En este modelo cada eslabón representa independientemente el muslo y la pierna, el tobillo se considera fijo, el modelo permite apreciar el movimiento de flexión y extensión de rodilla y de la cadera durante la fase de apoyo de la marcha humana. El modelo hace uso de información antropométrica del robot tal como; longitud, centro de gravedad y momentos inerciales de cada eslabón. Como también datos cinemático [38].

Modelado dinámico multicuerpos

Es bien conocido por investigadores de robots humanoides que la marcha bípeda robusta y ágil no se puede obtener por medio de modelos simplificados. Por lo tanto, obtener el modelo dinámico preciso del robot se convierte en todo un desafío, pero además se convierte en una herramienta importante para entender la naturaleza del robot y poder mejorar las habilidades de locomoción. Por ejemplo en [56] se calcula el modelo dinámico preciso del robot Thomas-K de 16 grados de libertad y además se diseña un modelo de impacto del pie contra el suelo. Con la obtención del modelo dinámico del robot se diseña un lazo de control realimentado tradicional. Otras investigaciones usan la optimización del consumo de energía mecánica y el modelo dinámico del robot en conjunto para calcular trayectorias de marcha bípeda [48] [32].

I.3.3. Control de Marcha Bípeda

Actualmente en proyectos de investigación se usa la medición de la inclinación de postura y la desviación del centro de masa como realimentación de las estrategias de control. Estas estrategias utilizan diferentes tipos de indicadores y algoritmos [41].

ZMP Control

Esta técnica de control fue introducida por primera vez hace más de 35 años, y actualmente es la más popular y con mejores resultados en investigaciones de robótica de bípedos. El control mediante ZMP establece un criterio de estabilidad dinámica para robots bípedos que permite generar patrones de locomoción [46]. El contacto plano entre el suelo y el pie es estable cuando el ZMP se encuentra dentro del polígono de soporte, cuanto más cercano



esté al centro de la superficie de soporte mayor robustez conseguirá el robot al caminar. Que el ZMP exista dentro del polígono de soporte es condición necesaria y suficiente para garantizar el equilibrio dinámico del robot [46] [9]. En [36] Kajita propone un control previo de ZMP para la generación de patrones de marcha bípeda, este utiliza un servo controlador seguidor de ZMP que utiliza ubicaciones futuras del ZMP y así calcular la trayectoria del CoM del robot con antelación al paso.

Redes Neuronales

Gran variedad de algoritmos neuronales son utilizados en el control y síntesis de marcha bípeda, por ejemplo; perceptrones multicapa, redes CMAC, función de base radial (RBF) o redes de Hopfield. Por ejemplo en [32] los autores presentan la comparación de tres estrategias de control de marcha bípeda basadas en redes neuronales artificiales, estas son; red neuronal en cascada con realimentación hacia adelante, red neuronal feed-forward y una red neuronal de base radial. La investigación demostró que la red neural de base radial entrega mejores resultados para el control y la síntesis de marcha bípeda. Recientemente, en [11] se presentó un modelo de control de aprendizaje basado en redes neuronales artificiales, cuyo objetivo consiste en aprender la dinámica no lineal del robot, las no linealidades aprendidas se utilizan junto con la señal de error filtrada para calcular los torques de las articulaciones.

Control Fuzzy

En [57] se propone una nueva técnica de control mediante reglas de lógica difusa, en el cual se plantea un ZMP variable en lugar de un ZMP fijo. Esta técnica posee la ventaja de eliminar las perturbaciones en el tronco del robot, y de esta forma mejorar significativamente la estabilidad del robot bípedo. En [58] se propone un nuevo método para modular la trayectoria del ZMP en los planos sagital y lateral, y así lograr una trayectoria de ZMP más flexible y por tanto robusta, esto se logró utilizando un control dinámico de balance que incluye un filtro de Kalman y controlador de movimiento Fuzzy.

Enfoque Híbrido

Otro enfoque como en [59] utiliza las ventajas de las redes neuronales y la lógica fuzzy denominado ANFS (Adaptive Neuro Fuzzy System), para modelar los datos medidos del ZMP desde un robot bípedo real. Este método demostró excelente desempeño por que



puede ser usado para modelar los movimientos del robot, y además extenderse fácilmente al control del robot bípedo.

I.3.4. Generación de Trayectorias

La generación de trayectorias de marcha, a su vez hace parte de un problema más general: el control conjunto de los diferentes actuadores que intervienen en el desplazamiento del robot [21]. La literatura sugiere que existen los siguientes enfoques.

Enfoque clásico. Este propone establecer funciones de trayectoria espacial para los pies o el CoM del robot, de tal forma que generen una marcha estable, y a continuación mediante cinemática inversa, se realiza la transformación de la ubicación espacial del pie o del CoM, en posiciones articulares, es decir generar trayectorias de marcha a nivel articular. Para lo cual es necesario realizar transformaciones cinemáticas directas e inversas con el método Denavit–Hartenberg, que suele resultar complejo [22]. En [54] se utiliza este método en combinación del modelo 3D LIPM y permite generar de forma sencilla patrones de marcha en tiempo real y además con cambio de dirección durante el desplazamiento.

Tablas de control. En [60] y [21] se presenta un enfoque que consiste en crear tablas que almacenan datos en forma de vectores de posición para cada articulación del robot. El controlador recorre la tabla conformada por los vectores de posición y envía durante cada instante las referencias de posición a los actuadores. El algoritmo de control es sencillo y puede embeberse en micro controladores de gama baja. No obstante, esta técnica es poco flexible puesto que al cambiar los movimientos es necesario re calcular toda la tabla de control.

Enfoque bio-inspirado o CPG's. En [20] Ijspeert afirma que las funciones de posición se pueden obtener de modelos procedentes de la naturaleza mediante Generadores Centrales de Patrones (CPG's), los cuales buscan precisar una función matemática que defina las posiciones articulares durante cada instante de un ciclo de marcha [21]. La mayoría de estudios de CPG's consisten en osciladores capaces de generar señales de control, incluso en ausencia de realimentación [37].

Otros autores como en [61] proponen unificar dos enfoques de generación de trayectorias, utilizando el enfoque de CPG's en régimen permanente como un oscilador de frecuencia fija mediante la técnica de ondas sinusoidales acopladas, y el enfoque de tablas de control



para almacenar y enviar los datos de las trayectorias al controlador del robot, este enfoque carece de realimentación.

I.4. Estado de la Técnica

En este capítulo se presenta la contextualización puntual de los tópicos que intervienen en la realización de este proyecto. Iniciando con la revisión del generador de marcha basado en el criterio del ZMP, el modelo de *péndulo invertido* y el modelo *Cart Table* propuesto por Kajita [36]. Luego se describen los generadores de marcha basados en optimización, y finalmente se examinan los trabajos relacionados con el consumo de energía de robots bípedos.

Existen diversos estudios acerca de la generación de patrones de marcha para robots bípedos, métodos y técnicas combinadas que intentan imitar los movimientos intrínsecos e inestables del ser humano. Sin embargo, hasta nuestros días la marcha de robots humanoides ha sido clasificada en estática o dinámica, esto de acuerdo a la proyección del centro de masa (CoM) sobre el suelo [45], [44]. En las técnicas de marcha estática la proyección del CoM sobre el suelo siempre se encuentra dentro del polígono de soporte, a diferencia de la marcha dinámica, en la cual para algunas fases de la caminata el CoM abandona el polígono de soporte.

Uno de los criterios de estabilidad mayormente usados es el Zero Moment Point (ZMP) propuesto por Miomir Vukobratovic en 1970 [46] como modelo teórico para el control del equilibrio en la locomoción bípeda. Fue hasta 1981 cuando fue demostrado de manera práctica en los laboratorios de la Universidad de Waseda, en el primer robot bípedo WL-10RD dinámicamente equilibrado, de la familia de robots WABOT.

La técnica de generación de patrones de marcha basados en el ZMP consta de tres etapas, en la primera se define la trayectoria deseada para el ZMP en los ejes (x,y) , denotada como ZMP_d , en segundo lugar se obtiene la posición del CoM_d a partir del ZMP_d con ayuda de un modelo simplificado de la dinámica del robot, y finalmente se utiliza la cinemática inversa para establecer las posiciones articulares que permitirán seguir el CoM deseado [62]. Por ejemplo en 2011 Xue y Chen en [63], diseñaron un generador de patrones de marcha en tiempo real para el robot Nao, en el cual representan la trayectoria del ZMP mediante un



polinomio cubico, de forma simultanea usaron el Modelo Lineal en 3D del Péndulo Invertido (3D-LIPM), propuesto por Kajita como representación dinámica de los movimientos del bípedo para calcular la posición y la velocidad del CoM, finalmente utilizaron los modelos cinemáticos de Nao para hallar las posiciones angulares de los actuadores en cada instante de la marcha [63]. En efecto el modelo 3D-LIPM propuesto por Kajita en 2001 [64] es una representación simplificada de la dinámica de la locomoción bípeda, conformado por el pie, la masa de la pierna despreciable y una masa puntual concentrada en el centro de gravedad del robot. Un dato interesante de este modelo consiste en la restricción de la altura de la masa sobre un plano horizontal, lo cual genera una dinámica lineal simple, y además muestra el motivo por el cual los robots que usan esta técnica mantienen siempre su cadera a una misma altura sin movimientos verticales [64]. Cabe destacar que este modelo fue probado inicialmente en el robot bípedo Meltran V de doce grados de libertad (12 GDL) [65]. La desventaja principal del modelo 3D-LIPM consiste en que la trayectoria generada para el CoM no es continua, ya que este modelo representa la dinámica en fase de apoyo simple, por tanto es necesario interponer los segmentos de la trayectoria del CoM en los periodos de soporte simple, lo cual aumenta la inexactitud [66]. Sin embargo se han presentado tres propuestas distintas de mejora del 3D-LIPM en búsqueda de mayor robustez, el primero es el péndulo invertido con soporte virtual [67], el segundo es el modelo con dos tipos de péndulo invertido [68], el tercero y más importante el péndulo invertido móvil [69], que permite generar trayectorias de marcha sobre terrenos irregulares, en contraparte la documentación bibliográfica es escasa para los tres avances.

Investigadores Iranés presentaron en la segunda Conferencia Internacional de Robótica y Mecatrónica de Tehran 2014 [70], un método de generación de patrones de marcha usando el Modelo de Gravedad Compensada del Péndulo Invertido (GCIPM) y considerando el movimiento del punto de ZMP debajo del pie de apoyo, el cual sigue una función de primer orden que inicia en el talón y avanza hasta terminar en la punta del pie, los resultados demostraron que el ZMP móvil hace que el movimiento del CoM sea suave. El estudio surge a raíz de que los métodos propuestos consideran el ZMP fijo en la mitad de la planta del pie durante el paso a paso. Pero en el pie humano, el ZMP no es fijo y se mueve hacia adelante bajo el pie de apoyo.

Por otra parte existe el modelo simplificado de locomoción bípeda Cart-Table propuesto por Kajita en 2003 [36], el cual consta de un carro o esfera que se desliza sobre la superficie de una mesa, la masa del carro es la masa total concentrada de robot y su ubicación muestra la posición del CoM del robot. Es importante resaltar que el pie de la mesa representa al polígono de soporte simple como también al polígono de soporte doble, esto según la fase de marcha en la que se encuentre el bípedo. Además, en el modelo original propuesto por Kajita, el ZMP no se limita a permanecer dentro del polígono de soporte y se puede obtener cualquier valor de ZMP fuera de este, lo cual ocurre justamente cuando la aceleración del carro es considerada grande, debida a que la reacción del contacto del pie con el suelo tiene una sola dirección.

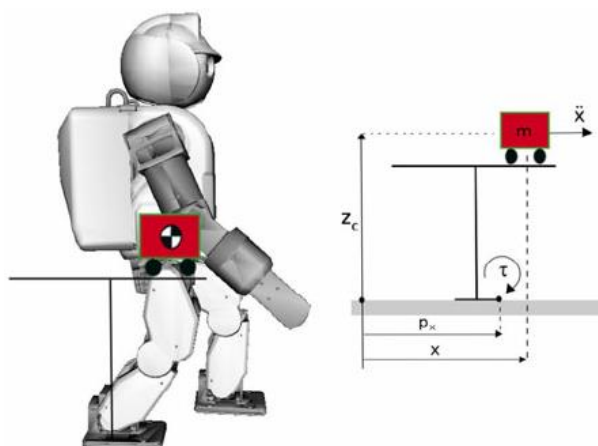


Figura 6. Modelo dinámico simplificado Cart-Table.

En la conferencia internacional sobre inteligencia de robots y sistemas de 2006, Kajita plantea un nuevo generador de patrones de marcha el cual permite un control auxiliar del ZMP [71], adicionado al generador basado en el ZMP preview control y Cart-Table de 2003. En este trabajo se asume que el ZMP objetivo puede ser separado en dos componentes sumatorios, un ZMP pre calculado y un ZMP auxiliar, donde este último puede cambiar en tiempo real y ser utilizado para absorber fuerzas externas que perturben el CoM, también para adaptarse a suelos irregulares mediante la modificación del ZMP pre calculado y recobrar posturas estables cuando el robot ha sufrido una inclinación. Una mejora de la representación del modelo Cart-Table es la superficie paramétrica [72] presentada en 2009 durante la conferencia internacional sobre robótica y biomecánica, que permite variar la altura del CoM para modificar la longitud del paso, como también reducir



el impacto de la planta pie contra el suelo evitando desequilibrios. Incluso si la superficie de la mesa es la adecuada este método permite al robot subir y bajar escaleras o sencillamente caminar en un terreno plano.

Teniendo en cuenta los párrafos precedentes es posible afirmar que la robustez que ofrece el modelo Cart-Table se adapta mejor a la generación de trayectorias dinámicamente estables del CoM, en comparación con el modelo 3D-LIPM.

En 2012 durante la Conferencia Internacional en Mecatrónica y Automatización investigadores chinos [44], plantearon establecer la trayectoria del CoM mediante técnicas de aprendizaje autónomo online bajo los objetivos de estabilidad y naturalidad al caminar. A diferencia de investigaciones anteriores, en las cuales la trayectoria del CoM del robot se calcula a partir del criterio de estabilidad ZMP o se predefine mediante una función sinusoidal, esta propuesta busca evitar y reducir el desajuste de los datos numéricos entre la planificación teórica y la planificación práctica.

Otra forma de abordar el problema de generación de marcha, consiste en hallar una solución a partir de las ecuaciones de dinámicas y las restricciones mecánicas del robot, buscando minimizar un índice de desempeño característico de la marcha. Para este enfoque es necesario contar con el modelo dinámico completo del robot. Chevallereau y Aoustin 2001 [31], plantean la generación de trayectorias de referencia de marcha óptimas para un robot bípedo sin actuadores en los tobillos. A cada articulación se le asigna una función polinomial, cuyos coeficientes son seleccionados mediante un criterio de optimización, que puede ser; velocidad máxima, minimización de torque en los actuadores y mínimo consumo de energía mecánica. Los autores anteriormente citados también destacan que en los actuadores eléctricos las pérdidas de energía se deben a la fricción y al efecto Joule, por tanto, es conveniente usar la optimización para la generación de trayectorias mediante la selección de un índice de desempeño que permita minimizar los torques. A diferencia del trabajo anterior en 2016 Bravo [73], propone reemplazar las trayectorias polinomiales por la representación mediante la expansión de series de Fourier, argumentando que al tratarse de la marcha humana como un procesos periódico es necesario mantener esta característica natural para preservar fluidez en los movimientos [74].

En 2014 durante la conferencia internacional sobre robots humanoides Feng y Whitman [12], presentan su investigación de marcha en la cual complementan un controlador de



cuerpo completo basado en dinámica inversa (ID), con la adición de la cinemática inversa (IK) que ayuda a compensar los errores de modelado. De igual manera optimizan simultáneamente la aceleración, torque y fuerzas de impacto contra el suelo mediante una función de costo.

En la locomoción de robots bípedos la minimización de la energía es un tema desafiante, puesto que este problema no puede ser resuelto meramente con el análisis de los modelos dinámicos del robot. Por otra parte en nuestros días, se ha mostrado que el movimiento vertical del CoM reduce el costo de energía mecánica y mejora la eficiencia energética de la marcha [75]. Shafii y Lau en 2014 plantearon una nueva estructura que mejora la eficiencia energética de la marcha basada en ZMP [76], mediante el estudio de la variación vertical del CoM, además de la longitud y el periodo de los pasos. Ellos utilizaron funciones básicas de Fourier para representar la trayectoria vertical del CoM, enseguida planearon las trayectorias del ZMP por medio del análisis de la posición del pie durante la marcha. Luego se determina la trayectoria horizontal del CoM mediante la solución del modelo 3D-LIPM respecto a las entradas del ZMP predefinido y a la trayectoria vertical del CoM, lo anterior por medio de un método numérico de solución de ecuaciones diferenciales propuesto por los mismos autores. Adicionalmente se aplica la estrategia Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES), que permite optimizar y encontrar la trayectoria vertical del CoM con mejor eficiencia energética. Chevallereau y Aoustin 2015 [77], confirman que el control de la mayoría de robots en la actualidad está basado en el 3D-LIPM, en el cual se asume un desplazamiento horizontal del CoM, mientras que el centro de masa de los humanos se caracteriza por realizar una oscilación vertical. Los investigadores proponen representar el movimiento vertical del CoM sobre el plano frontal mediante una función sinusoidal que evidencie el cambio de la altura sobre el eje Z y su posición horizontal, y así mejorar la estabilidad del robot en terrenos planos. En [7] se explica que este fenómeno se presentó durante la generación de trayectorias de marcha de HRP-4 y que al mantener constante la altura de la cintura, las articulaciones de la rodilla necesitan mayor potencia, adicionalmente notaron que los pasos con mayor longitud también requieren más potencia en los actuadores.

El lector debe tener claro que la información presentada está relacionada con la reducción del consumo de energía eléctrica a partir de la reducción del consumo de energía mecánica,



ya sea para generadores basados en ZMP con modelos simplificados, o en técnicas de optimización con modelos dinámicos completos. Según [13], la gran capacidad de movimientos de los robots bípedos de la actualidad demuestra su creciente versatilidad, y que luego de haber solucionado el desafío de la movilidad se debe pensar en el diseño de robots para conseguir ahorro energético. La medida más objetiva para cuantificar el ahorro energético de diferentes formas de locomoción es el Costo Energético de Transporte (COT), cuya unidad es adimensional ($J/N \cdot M$) y expresa la cantidad de energía requerida para mover una unidad de peso a lo largo de una unidad de distancia. El autor también muestra claramente que cada modo de transporte tiene cualidades que favorecen la economía o la versatilidad, y que la forma de locomoción con patas actualmente no proporciona ambas.

En 2008 sobre la plataforma comercial Nao de Aldebaran Robotics, se realizó un estudio sencillo e interesante de marcha a baja potencia [78], en el cual se planteó disminuir la rigidez de las articulaciones, que a su vez se traduce en limitar la potencia disponible que llega a los motores, hasta un punto en el que las articulaciones aun puedan seguir las trayectorias de referencia. Se realizaron mediciones del consumo de corriente de cada motor, puesto que los actuadores de Nao poseen un sensor interno de corriente. El método mostró el aumento de la velocidad y la disminución del consumo de energía. También se realizó la medición de la eficiencia, con ayuda del Costo Energético de Transporte, obteniendo pruebas en las que método propuesto obtuvo un $COT=2.4$, y la marcha original de Aldebaran un $COT=5.8$ evidenciando la mejora planteada.

En [16], los autores presentan un sistema pasivo que incrementa la eficiencia energética de la marcha de un robot humanoide virtual. Esto se logra mediante la adición de un elemento elástico, tal como un resorte, ubicado entre articulaciones, el cual aprovecha la energía potencial y las posturas de altura. Por ejemplo, cuando el robot está erguido el resorte se estira y almacena energía, la cual puede ser calculada con ayuda de la ley de Hooke. Varios experimentos de simulación fueron realizados para diferentes valores de las constantes de elasticidad del resorte, los modelos de los motores fueron incluidos completamente. Finalmente, el trabajo demostró mediante el cálculo de la potencia en los motores un ahorro del 19% de energía respecto a una caminata normal.



Finalmente es necesario mostrar el enfoque de marcha dinámica pasiva el cual evita los controladores y se centra en producir una marcha cíclica sin necesidad de actuadores energizados, es decir no consume energía y sus articulaciones se accionan como un péndulo libre al descender por un terreno inclinado por efecto de la gravedad. Esta clase de robots posee un coste energético de transporte nulo, sin embargo su versatilidad de movimientos es deficiente [79].



Capítulo II: Sistema de Medición de Energía

En este capítulo se presenta el sistema electrónico de adquisición de datos de consumo de potencia eléctrica, el cual ha sido acoplado al cuerpo del robot, este a su vez cumple con enviar información de manera inalámbrica hasta el aplicativo software de procesamiento y visualización de señales. Inicialmente se describe el diseño del regulador en serie, usado para alimentar el circuito electrónico de medición y al mismo tiempo evitar cambios atípicos en los datos obtenidos cuando existen variaciones instantáneas de corriente y voltaje provenientes de la batería del robot. También se mostrará el diseño de los sensores, tanto el de corriente como el de voltaje. Por su parte las señales entregadas por los sensores son normalizadas y escaladas a los rangos de voltaje del convertidor analógico digital que incorpora la tarjeta de procesamiento usada. Enseguida estos valores digitales se envían, almacenan y visualizan en una interfaz de usuario creada en Matlab.

Se debe destacar que físicamente el sistema de adquisición y procesamiento cumple características mínimas de tamaño, peso y consumo de corriente. Lo anterior teniendo en cuenta que las dimensiones no deben superar un tamaño de 14cm de largo por 12cm de ancho, igualmente el peso no debe exceder 100gr. Si estas medidas físicas son considerables respecto al propio peso y tamaño del robot, el modelo dinámico obtenido y los modelos de masa concentrada usados en el cálculo de las trayectorias de marcha no corresponderían con los del robot real, impidiendo la realización de pruebas. Por otra parte, la cantidad de corriente eléctrica usada por el sistema de adquisición y procesamiento no debería ser considerable respecto al consumo de los actuadores del robot, de esta manera se logra que el consumo energético de todos componentes electrónicos usados en el sistema de adquisición sea aparentemente despreciable comparado con el consumo de las articulaciones del robot. No obstante, el sistema de adquisición de datos propuesto, se diseñó para incluir la medición de todos los componentes que intervienen el desarrollo de las pruebas de marcha de robot, es decir tarjetas controladoras, módulos de comunicación, motores, sensores y demás elementos usados.

El sistema completo de medición y monitoreo del consumo de energía eléctrica, se planteó en cuatro etapas de desarrollo de acuerdo con la estructura mostrada a continuación.

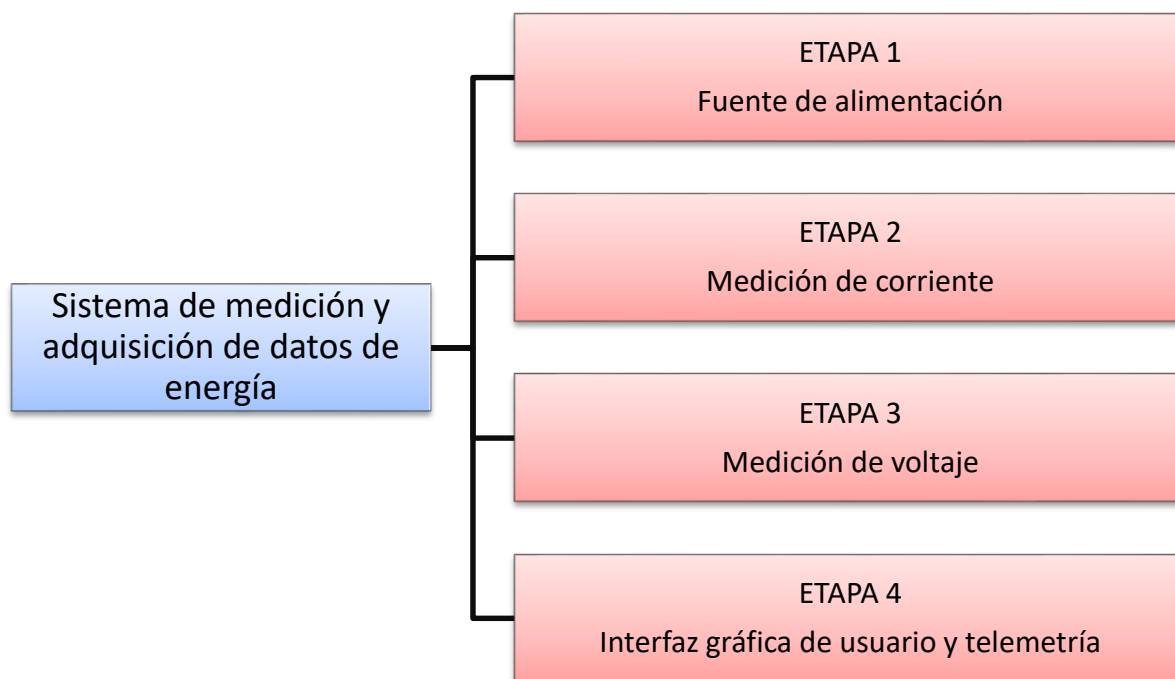


Figura 7. Diagrama de consecución del sistema de medición propuesto.

Por su parte las etapas 1, 2 y 3 corresponden a la propuesta electrónica de medición, adquisición y comunicación de datos es mostrada en la figura 7, mientras que la etapa 4 corresponde al aplicativo para computador y la comunicación. Acerca de esta etapa se hará una breve descripción en los párrafos posteriores.

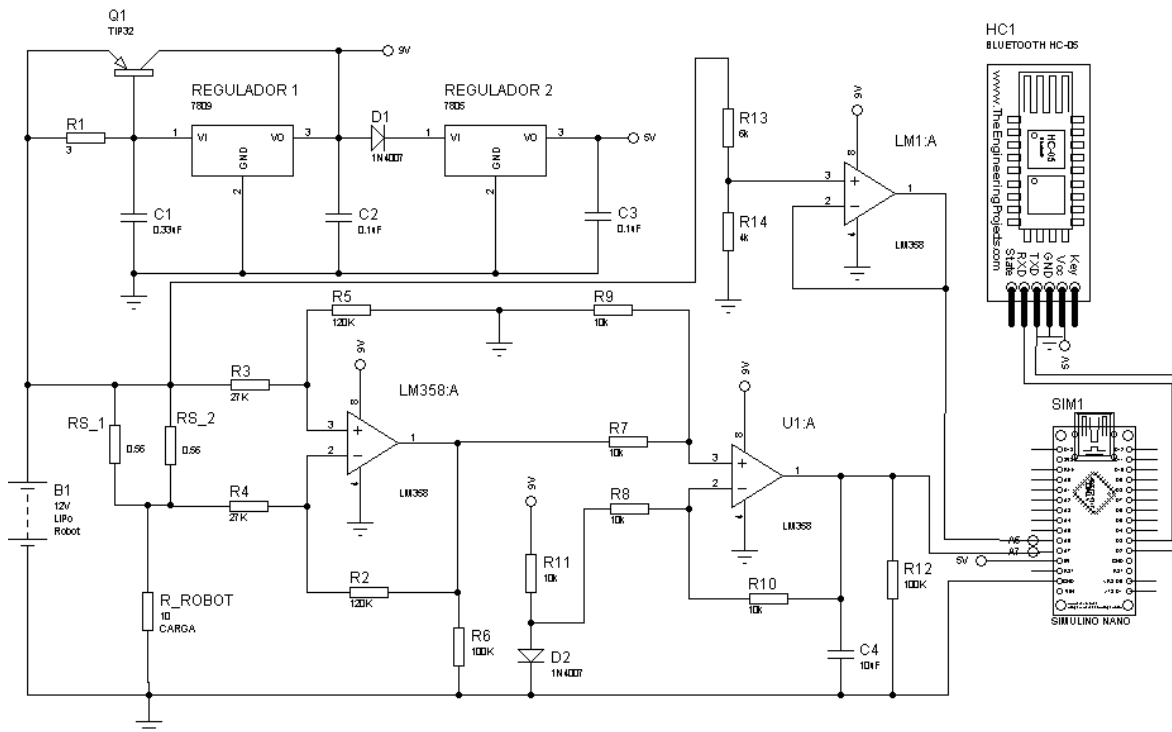


Figura 8. Sistema electrónico de medición.

II.1. Etapa 1: Fuente de Alimentación

Originalmente se establece que los componentes electrónicos, tanto analógicos como digitales, necesarios para la construcción de sistema de adquisición de datos se energizarían directamente de la batería que alimenta el controlador CM-530 del Bioid y también a sus actuadores. Es decir, a la batería del robot se conectan tres cargas eléctricas generales; los motores del robot, su controlador y el nuevo sistema de adquisición diseñado. De manera nominal el robot se alimenta con 12 VDC y con consumo de corrientes en un rango de 1A hasta 4A cuando el robot no se encuentra en reposo. Sin embargo, alimentar el sistema de medición directamente de la batería del robot resulta no conveniente durante las primeras pruebas de medición. En primer lugar, la batería original del robot no entrega las prestaciones pico de corriente necesaria para movimientos instantáneos del robot, lo cual se traduce en caídas bruscas de voltaje que a su vez reinician o apagan el sistema de medición de energía, al igual que los módulos de comunicaciones y al mismo tiempo perjudica la captura y almacenamiento de datos. Asimismo, la tarjeta de adquisición utilizada posee un ADC (Convertidor Analógico Digital), con referencial de voltaje constante a 5V para tomar

muestras, es decir se envían datos erróneos si el referencial no es el idéntico durante toda la prueba.

En consecuencia, se opta por utilizar una batería de LiPo 2200mAH a 12V, para mejorar las prestaciones de flujo corriente y evitar cambios de voltajes bruscos, asimismo se diseña un sistema de adquisición y envío de datos con funcionamiento a bajo voltaje. También se implementa un arreglo de reguladores de tensión en serie y condensadores para evitar el rizado en el voltaje de alimentación del sistema propuesto, impidiendo el reinicio de la tarjeta de adquisición y sobre todo solucionar la afectación del referencial de voltaje usado en el muestreo de señales. Finalmente, el regulador propuesto es mostrado en el siguiente esquema electrónico.

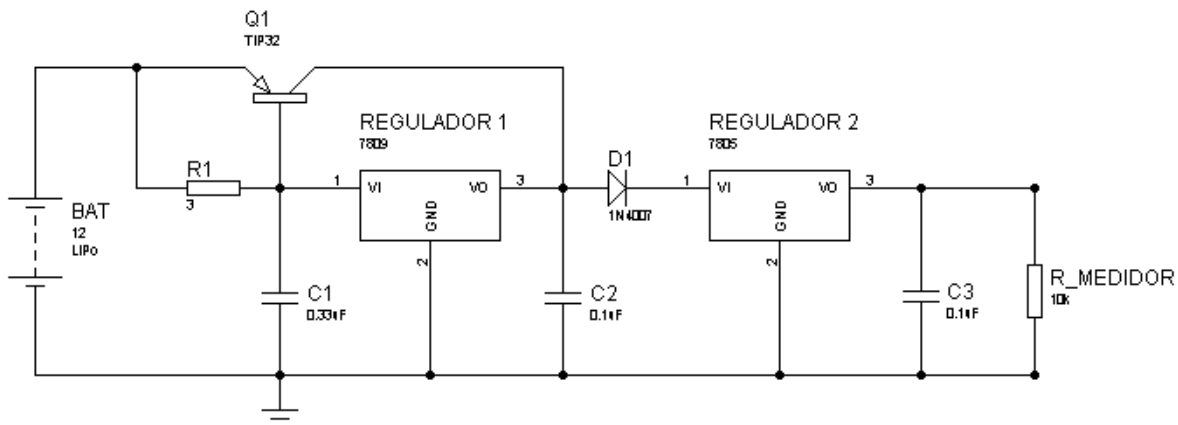


Figura 9. Circuito regulador de voltaje. (Tomado notas de clase electrónica básica 2010 Universidad del Cauca)

II.2. Etapa 2: Medición de Corriente

El componente de medición de corriente se ha diseñado totalmente bajo esquemas electrónicos de la literatura estándar y otras técnicas de medición de corriente como se muestra en la figura 10, lo anterior a razón de previa experimentación con sensores comerciales de corriente que presentaron inconvenientes, tales como; rango de medición demasiado amplio y poco precisos en su medición, inclusive durante cada experimentación algunos de estos debían nuevamente ser calibrados.

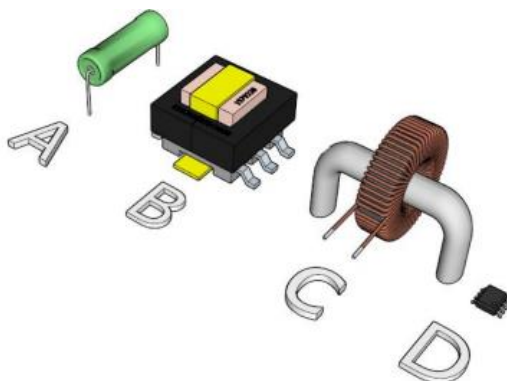


Figura 10. Tamaños y tipos de sensores de corriente. A) Resistivo, B) Transformador de corriente, C) Bobina Rogowski, D) Sensor de estado sólido de efecto Hall. (Imagen tomada de bibliografía [80])

Por tanto estos sensores no se ajustan completamente a las necesidades y condiciones del proyecto, es así que en la medición del consumo de corriente de todos los sistemas eléctricos del robot, se optó por usar como elemento principal de sensado una carga resistiva tipo shunt, para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de esta mediante la medición de la diferencia de tensión entre sus terminales [81]. La resistencia shunt está conectada en serie entre la batería del robot y la carga a medir, en este caso la corriente consumida por el robot. La resistencia de shunt utilizada posee características de precisión del orden de 1% de error y posee un valor de 0.28Ω . La potencia a disipar de máximo 4 Watts, lo cual resultó ser un inconveniente, puesto que los elementos resistivos diseñados para estos valores de potencia son grandes en tamaño, de modo que se dificulta la instalación dentro del circuito impreso diseñado para el cuerpo del robot. Como recurso alternativo se utilizan dos resistencias de 0.56Ω a 2 watts en paralelo, mucho más pequeñas en tamaño, pero con iguales prestaciones de potencia, adicional a esto el valor de la nueva resistencia en shunt producto del paralelismo permite tener un valor exacto de 0.28 ohm de modo que el sensor tenga mejores características de medición.

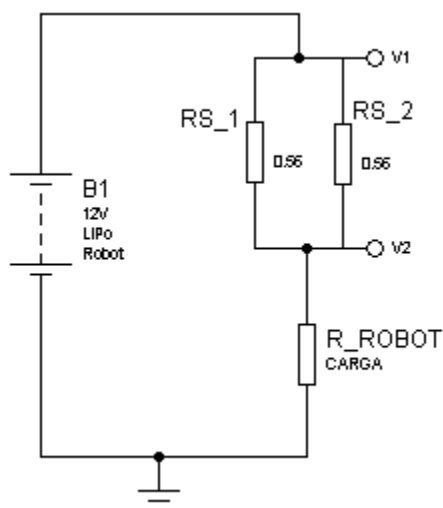


Figura 11. Esquema básico funcionamiento carga resistiva shunt.

La resistencia de shunt está acompañada de dos etapas posteriores, Figura11, la primera de ellas compuesta por una configuración en diferenciador del amplificador operacional LM358 el cual determina la diferencia algebraica entre el terminal V1 y el terminal V2 del arreglo shunt. Esta primera configuración traduce el nivel de corriente a voltaje y lo amplifica, ver figura 12.

$$R_{shunt} = 0.28 \Omega$$

La relación matemática entre el voltaje de entrada en el paralelismo shunt y el voltaje de salida V_o en la primera etapa del amplificador diferenciador es:

$$V_o = V1 * \left(\left(\frac{R2}{R3 + R2} \right) * \left(1 + \frac{R1}{R4} \right) \right) - \left(V2 * \frac{R1}{R4} \right) \quad (1)$$

Para esta configuración se establece $R2 = R1$ y $R3 = R4$, entonces la relación matemática anterior queda simplificada a la siguiente forma:

$$V_o = \frac{R1}{R4} * (V1 - V2) \quad (2)$$

Siendo $(V1 - V2)$ el voltaje en los terminales del resistor shunt R_{shunt} . Por otra parte, se diseña para que el voltaje máximo entre los terminales de la resistencia shunt bajo criterios de consumo máximo del robot con una carga de hasta 4A, estaría dada por la expresión:

$$V_{shunt-max} = I_{L-max} * R_{shunt} = 4A * 0.28\Omega = 1.12V \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que en el diseño propuesto $R1=120 \text{ k}\Omega$, mientras que $R3=27 \text{ k}\Omega$, por tanto, a la salida de esta primera etapa del convertidor de corriente a voltaje por máximo es



de 4.97V, lo cual es adecuado para la conexión con el conversor analógico digital, esto se evidencia en la siguiente relación:

$$V_o = \frac{R1}{R4} * (V1 - V2) = \frac{120\text{ K}\Omega}{27\text{ K}\Omega} * 1.12\text{ V} = 4.977\text{ V} \quad (4)$$

Esta primera configuración además de amplificar la diferencia de voltaje entre los terminales de entrada, introduce la ganancia de los terminales en modo común. De forma experimental se observa que esta configuración añade un voltaje constante a la salida de 0.66V, por esto se añade en seguida otro amplificador, el cual resta el voltaje de polarización de un diodo rectificador de silicio de aproximadamente 0.7V. Es decir, la segunda configuración se encarga de reducir la relación de rechazo en modo común de los terminales del amplificador operacional, intentando que esta se aproxime a cero, sin embargo, nunca llega a serlo pues se trata de un amplificador real más no ideal. En cuanto a la ganancia esta no se ve alterada, puesto que la ganancia de esta segunda configuración es la unidad, ya que $R6 = R7 = R8 = R9 = 10\text{K}\Omega$. Luego de esta etapa, el terminal Vo_To_ADC está conectado al primer módulo de conversión analógico digital de la tarjeta de adquisición usada.

Finalmente se debe destacar que el diseño electrónico propuesto para medición de corriente se basa en libro de medidores shunt propuesto por el fabricante Texas Instrument en [82]. El diseño completo utilizado para la medición de corriente es mostrado a continuación.

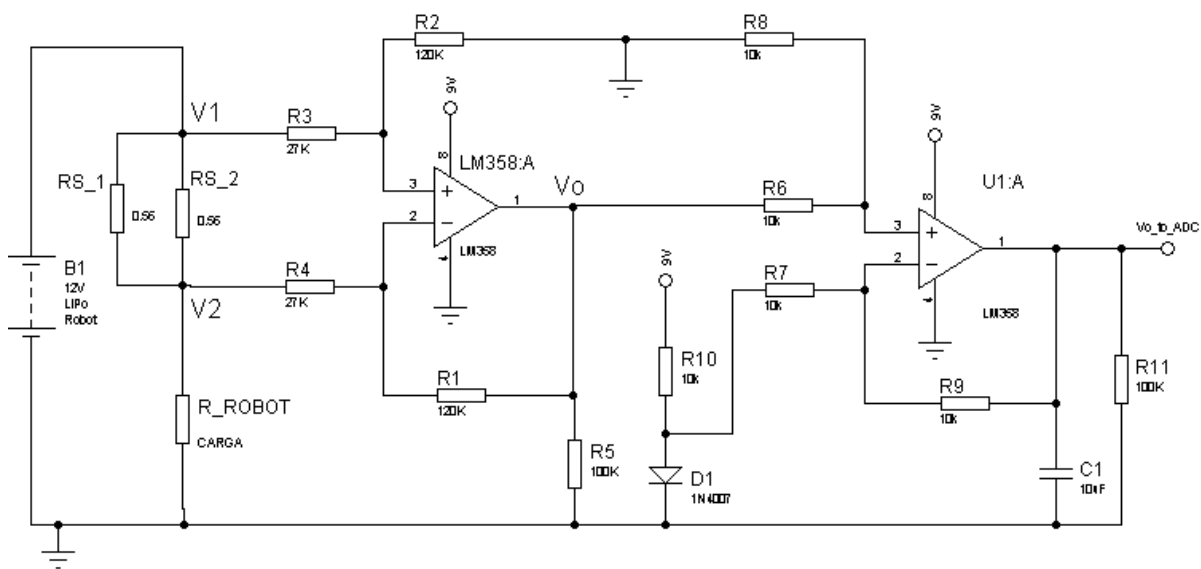


Figura 12. Circuito medidor de corriente propuesto.

II.3. Etapa 3: Medición de Voltaje

El medidor de voltaje consiste en esencia del convertidor analógico digital de la tarjeta usada, sin embargo se debe resaltar que el convertidor toma muestras de señales de voltaje entre 0 a 5V, por tanto no es posible medir directamente el voltaje de la batería del robot, en ese caso se elige un arreglo sencillo de resistencias en serie que forman un divisor resistivo, el cual está conectado en sus extremos directamente a los terminales de la batería del robot, mientras que el nodo central del divisor resistivo está conectado al segundo módulo de conversión analógico digital de la tarjeta de adquisición usada. En la figura 13 se observa el diagrama eléctrico planteado.

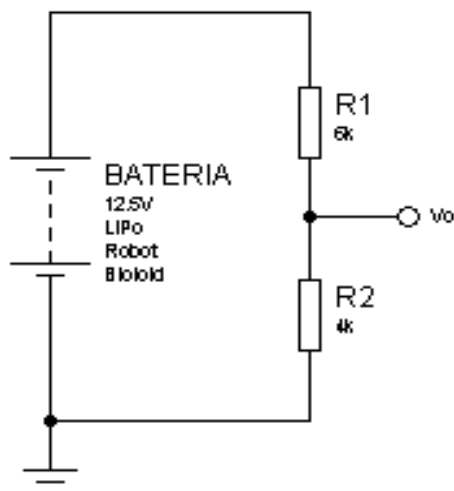


Figura 13. Divisor resistivo para el medidor de corriente.

Los valores de las resistencias se eligen teniendo en cuenta que durante el procedimiento de carga de la batería esta alcanza un voltaje máximo de 12.5V, por lo tanto, el voltaje máximo sobre la segunda resistencia debería ser 5V, es decir que sobre esta misma resistencia debe reflejarse el 40% del voltaje total de la batería, dando lugar a la elección de las resistencias $R1 = 6\text{ K}\Omega$ y $R2 = 4\text{ K}\Omega$. Luego del divisor resistivo se añade una configuración de amplificador operacional en seguidor de tensión o amplificador buffer, el cual posee ganancia unitaria lo cual indica que el voltaje en la entrada es idéntico al voltaje en la salida. El propósito de este arreglo electrónico reside en el aislamiento que ofrece entre la resistencia R2 y la baja impedancia de entrada del módulo conversor analógico

digital, en efecto si se conectasen directamente en paralelo la resistencia R2 y el módulo de conversión como se pretende, el resultado de este paralelismo resistivo tiende a la resistencia de menor valor, es decir al del módulo de conversión, lo que a su vez daña la regla del 40% del voltaje total de la batería del robot, tal como se establece en el párrafo anterior. Entonces es necesario añadir un seguidor de tensión el cual posee la característica de brindar alta impedancia de entrada, bastante grande comparada con la resistencia R2 lo cual es oportuno puesto que no altera la regla establecida, y con baja impedancia de salida para la conexión con el segundo conversor analógico digital. La siguiente imagen muestra el circuito descrito para medir voltaje.

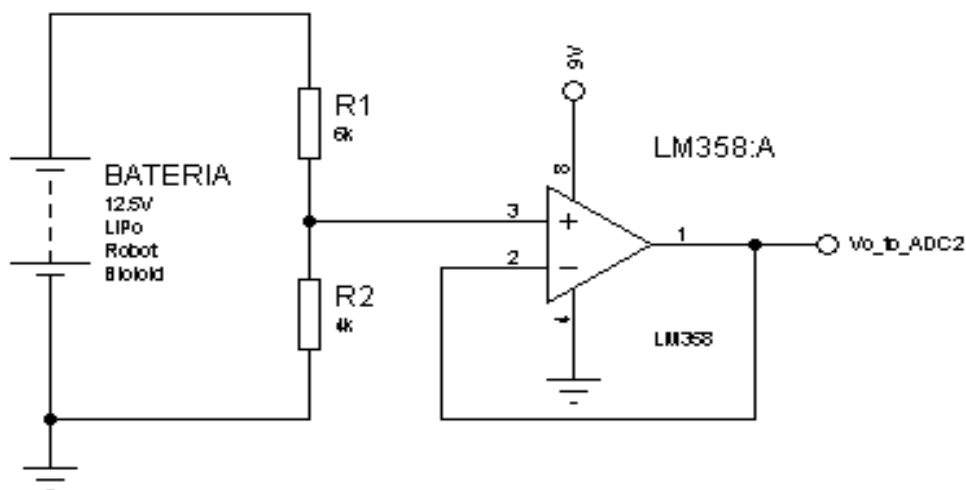


Figura 14. Circuito propuesto para medir voltaje.

II.4. Etapa 4: Interfaz Gráfica de Usuario y Telemetría

En la parte final respecto a electrónica y programación se realiza la configuración de la comunicación serial y los dos módulos de conversión analógica digital de la tarjeta de adquisición usada, en este caso la placa arduino nano V3, en ella se establece inicialmente el periodo de muestreo en 50 mili-segundos para muestrear las señales de corriente y voltaje provenientes de la batería del robot. Por su parte los dos módulos de conversión analógica digital, que en efecto poseen una resolución de 10 bits, adquieren un dato de corriente y uno de voltaje en cada periodo de muestreo, con un rango de medición analógico de 0 a 5V, enseguida ambos datos son normalizados a valores entre 0 y 1023 bits. Posterior a esto los datos son enviados por medio de comunicación serial Bluetooth a una velocidad de 9600 bps, hasta el aplicativo para computadora desarrollado en Matlab.

El aplicativo software de escritorio consiste en una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Matlab sobre el toolbox Guide. Esta interfaz posee cuatro ejes gráficos; el primero para voltaje, el segundo para corriente, el tercero para potencia y el cuarto para energía, los cuales se muestran para cada instante de muestreo mientras se realiza un experimento de marcha con el robot.



Figura 15. Interfaz gráfica de usuario, sistema de medición y monitoreo del consumo de energía eléctrica del robot Bioloïd.

Tras ser recibidas las señales en el aplicativo, tanto el voltaje como la corriente deben ser escalados nuevamente a sus valores analógicos y ser enviados a su respectivo eje gráfico cada uno con buffer de 1000 datos, mientras que la potencia es calculada mediante el producto elemento a elemento entre el voltaje y la corriente. Por su parte la energía eléctrica consumida se obtiene a partir de la integral de la potencia eléctrica. Lo anterior indica que en tiempo continuo la energía se obtiene con la siguiente expresión.

$$E(T_{prueba}) = \int_0^{T_{prueba}} P(t) dt \quad (5)$$

Sin embargo, la ecuación anterior no se aplica directamente sobre señales discretas, así pues, el cálculo de la energía consumida en el transcurso del experimento de marcha se determina mediante la técnica de integración digital de Tustin o también conocida como aproximación bilineal, la cual se basa en el cálculo consecutivo del área para formas

geométricas planas conocidas. Este cálculo se aplica directamente sobre el vector de la señal de potencia eléctrica en cada periodo de muestreo. Dicho de otra manera, el método de integración usado calcula el área bajo la curva de la señal de potencia eléctrica entre un tiempo inicial y un tiempo final, correspondientes a la duración de un periodo de muestreo T_m . La imagen siguiente es un ejemplo de la señal de potencia eléctrica $p(t)$ la cual es medida cada T_m segundos.

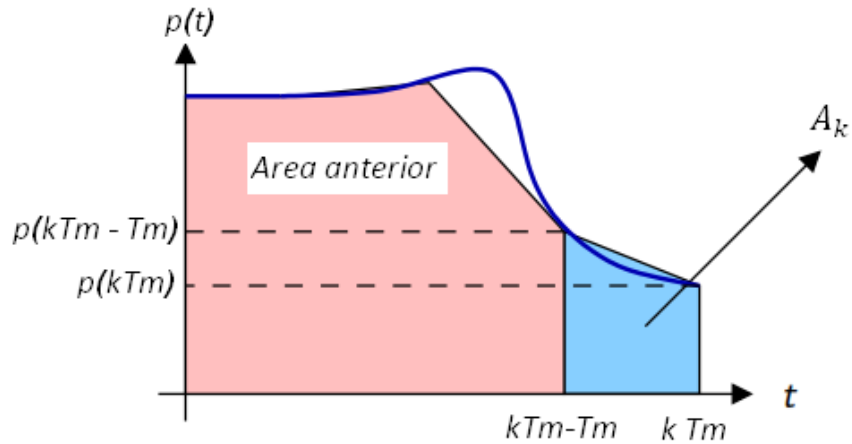


Figura 16. Imagen de ejemplo potencia eléctrica.

Suponga que, a partir de la señal presentada en la imagen anterior, se debe determinar la energía eléctrica, en otras palabras, esto consiste en calcular el área bajo la curva con la aplicación del método de Tustin. Como dicha señal es de tiempo discreto, se debe hallar el área de cada segmento k , comprendido entre dos datos medidos en un periodo de muestreo T_m , y realizar la acumulación de todas las áreas hasta el k -ésimo segmento A_k . El método sugiere que la integral se obtiene a partir de la siguiente expresión general:

$$A_{total} = A_{anterior} + A_{k-esimo} \quad (6)$$

Si se concentra en particular sobre el último segmento A_k este se puede descomponer como la suma de dos áreas; el área de un rectángulo A_R y el área de un triángulo rectángulo A_T . La siguiente imagen describe mejor este concepto.

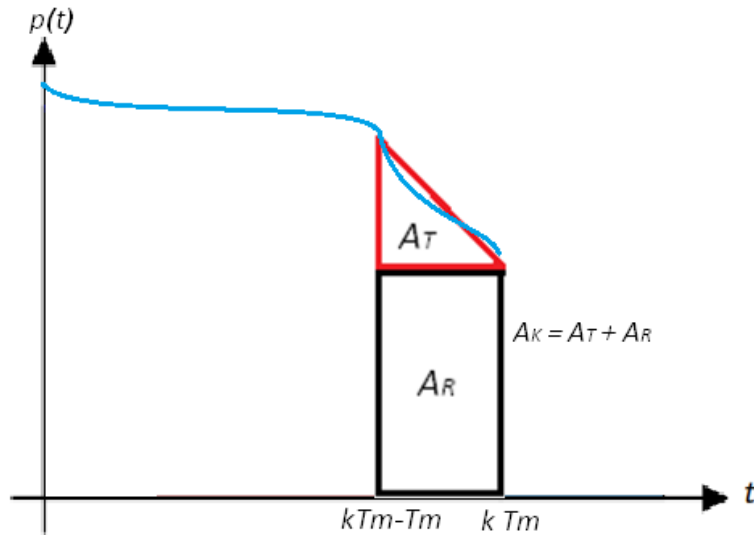


Figura 17. Representación del segmento A_k método de integración Tustin.

La figura anterior indica que el área de color rojo, perteneciente a la forma plana A_T descrita por el triángulo es:

$$A_T = \frac{Tm [p(kTm - Tm) - p(kTm)]}{2} \quad (7)$$

Por su parte área de color negro indica que el área del segmento A_R descrita por el rectángulo es:

$$A_R = Tm * p(kTm) \quad (8)$$

Como resultado el área del segmento A_k es la suma del área del triángulo más el área del rectángulo:

$$A_k = \frac{Tm}{2} [p(kTm - Tm) + p(kTm)] \quad (9)$$

Por último, el cálculo de la energía eléctrica $E(t)$ hasta el instante actual durante la realización de una prueba de marcha del robot está dado por la expresión:

$$A_{acumulada} = A_{anterior} + \frac{Tm}{2} [p(kTm - Tm) + p(kTm)] \quad (10)$$

El resultado de aplicación del método y la funcionalidad del sistema completo de adquisición y monitoreo se verifica en el capítulo denominado resultados. Finalmente cabe destacar que el procesamiento y cálculo de las señales de potencia y energía se realiza completamente en la aplicación para computadora, mientras que la placa de adquisición de datos se usa únicamente para el muestreo y la transmisión inalámbrica de información.



En este capítulo se expuso el diseño e implementación completo de un sistema inalámbrico de monitoreo del consumo de energía eléctrica para el robot bípedo Bioloid Premium, con el cual se procede a capturar los datos de potencia eléctrica durante las pruebas de marcha, las cuales serán diseñadas bajo dos técnicas diferentes de generación de caminata en robots bípedos, presentadas en los dos capítulos siguientes.

Capítulo III: Generación de Trayectorias de Marcha Bajo el Modelo Cart-Table y el Indicador de Estabilidad ZMP

En esta parte del proyecto se presenta el diseño y generación de los patrones de marcha para el robot bípedo Bioloid, para lo cual se ha utilizado el modelo dinámico Cart-Table propuesto por Kajita [36], [71] como representación simplificada y aproximada de un robot bípedo.

Por su parte los denominados patrones de marcha constituyen un grupo de ángulos articulares ordenados consecutivamente para dar un movimiento deseado de caminata bípeda en el tiempo. A su vez la marcha de los robots bípedos se clasifica de dos formas según la proyección del centro de masa (CoM) sobre el suelo, bien sea en marcha estática o marcha dinámica. En el caso de la marcha estática, la proyección del CoM sobre el suelo nunca abandona del polígono de soporte, por lo que es necesario mover el CoM del robot sobre el siguiente pie de soporte antes de que el pie en fase de balanceo se despegue del suelo. Aplicando este tipo de marcha se garantiza estabilidad, pero se sacrifica la longitud del paso y la velocidad de marcha. Por otra parte, en la marcha dinámica hay periodos donde la proyección del CoM del robot se sale del polígono de soporte, aquí solamente el ZMP debe mantenerse dentro del polígono de soporte, de este modo se puede incrementar la velocidad de marcha pues la longitud del paso puede ser mayor comparada con la marcha estática.

La técnica de generación de trayectorias pre-calculadas de marcha dinámicamente estable se basa en el criterio de ZMP y posee la estructura de desarrollo mostrada en la figura 18, la cual se sigue en este trabajo. También se debe destacar que la aplicación de esta técnica se realiza sobre el robot Bioloid sin embargo la generación de patrones es off-line.

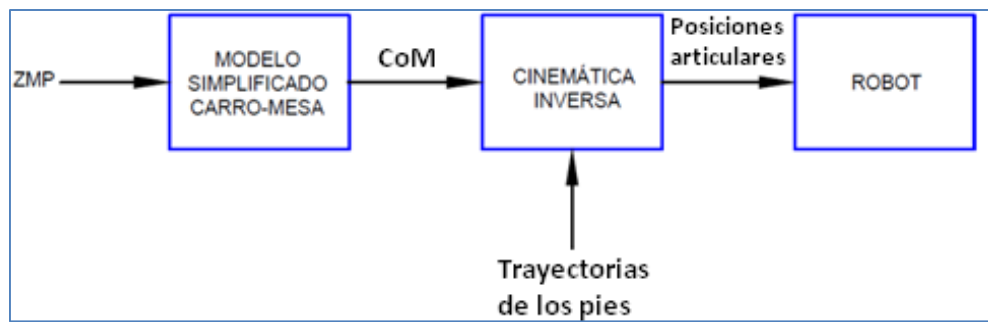


Figura 18. Estructura del generador de patrones de marcha mediante el modelo Cart Table y el criterio de ZMP [66].



De acuerdo a la estructura anterior del generador de patrones propuesto para este proyecto, el desarrollo de la técnica consta de las siguientes etapas.

1. Teniendo en cuenta la estructura física del robot, la longitud del paso y otras características geométricas de la marcha se diseña una trayectoria para cada pie mediante interpolación polinomial.
2. Se traza la trayectoria del ZMP con ayuda de la ubicación de las proyecciones de los pasos que dará el robot, es decir con base en las proyecciones del polígono de soporte durante la marcha se establece una trayectoria de ZMP deseada.
3. A continuación, se utiliza el modelo dinámico simplificado Cart Table para reemplazar el modelo dinámico real del robot y además usando la trayectoria del ZMP obtenida del punto anterior se determina la trayectoria del CoM del robot.
4. Finalmente utilizando la trayectoria del CoM y las trayectorias de los extremos de los pies, se utiliza la cinemática inversa para conocer las posiciones angulares que deben adoptar los servomecanismos del robot.

Para el abordaje de la técnica de generación de marcha propuesta por Kajita, se establecen los parámetros característicos y operativos de la caminata que realizará el robot, concretamente se establecen las siguientes consideraciones a tener en cuenta durante la generación de marcha y en los propios experimentos:

- ✓ El robot se desplaza sobre una superficie plana y horizontal.
- ✓ Las trayectorias del pie derecho e izquierdo son iguales, aunque estas se encuentran desfasadas la una con respecto a la otra, en otras palabras, mientras un pie se encuentra en fase de soporte simple el otro se encuentra en fase de balanceo.
- ✓ Existe una fase intermedia de soporte doble de los pies.
- ✓ Las trayectorias de marcha se diseñan en el espacio cartesiano, por lo cual adoptan posiciones cartesianas en (X, Y, Z) , al igual que orientaciones mediante ángulos de Euler (Φ, θ, ψ) .
- ✓ El marco de referencia (X_o, Y_o, Z_o) está ubicado en el cuerpo cero del robot o tronco corporal.
- ✓ La marcha propuesta es omnidireccional, sin embargo, en este trabajo se diseñó únicamente para el avance del robot.



- ✓ La altura del CoM es constante y toma un valor Z_c respecto al referencial inercial (suelo), esto se detalla en párrafos posteriores.
- ✓ La rotación Φ de los pies respecto al eje X es constante e igual a cero, de esta manera se asegura que la planta de pie permanezca paralela al suelo.
- ✓ La rotación θ de los pies respecto al eje Y es constante e igual a cero, de esta manera se asegura que la planta de pie permanezca paralela al suelo.

Por otra parte, la marcha generada posee parámetros característicos los cuales se listan en la siguiente tabla.

Parámetro	Descripción	Valor
g	Gravedad de la tierra	9.8 [m/s ²]
Z_c	Altura del CoM	21.3×10^{-2} [m]
L_p	Longitud del paso	4×10^{-2} [m]
W_p	Distancia que separa el centro de ambos pies	8×10^{-2} [m]
A_p	Altura que alcanza el pie en fase de balanceo	4×10^{-2} [m]
T_p	Tiempo de duración del paso	2 [seg]
h	Periodo de muestreo	0.005 [seg]
Q	Factor de ponderación	1
R	Factor de ponderación	1×10^{-4}
N	Numero de muestras futuras del ZMP	320

Tabla 1. Parámetros de marcha elegidos para la generación de patrones.

La altura del CoM se elige con base en el desarrollo de los modelos de cinemática y dinámica espacial del robot realizados en trabajos previos [73]. El periodo de muestreo, los factores de ponderación Q y R, el número de muestras futuras N del buffer de almacenamiento, se eligen de acuerdo a los documentos ofrecidos por el autor [36] [71].

También se debe elegir el tiempo de duración de la fase de soporte doble T_{ds} y la duración de la fase de soporte simple T_{ss} , esto respecto al tiempo de duración de un paso completo, la elección de estos tiempos se hace de acuerdo con la literatura consultada en [83].

$$T_{ss} = 80\% T_p$$

$$T_{ds} = 20\% T_p$$

Esto indica que el tiempo de soporte simple se hará en 1.6 segundos, mientras que el tiempo de soporte doble tan solo será de 0.4 segundos. Se aclara que tras los experimentos en los cuales se aumentan y/o disminuyen la velocidad de marcha, estos se ven afectados, es decir, si se aumenta la velocidad de marcha el periodo de soporte doble decrece, esto puede asemejarse tal como cuando el ser humano corre en el cual el soporte doble tiende a desaparecer. Las velocidades establecidas para las pruebas de consumo de energía se detallan en el capítulo final.

Una vez se establecen los lineamientos que se desean para la caminata del robot se procede a desarrollar la técnica de generación de trayectorias de marcha propuesta de acuerdo con las fases expuestas en párrafos anteriores.

III.1. Diseño de las Trayectorias para los Extremos de los Pies

En primera instancia se diseña la trayectoria deseada para el punto central de la planta de los pies, en este caso se toma el eje X como la dirección de avance durante la marcha, mientras que el eje Y muestra la ubicación de los puntos geométricos a los cuales debe llegar cada pie para alcanzar los pasos preestablecidos en el espacio cartesiano de referencia. La figura 19 muestra la ubicación de los pies en el instante inicial de marcha.

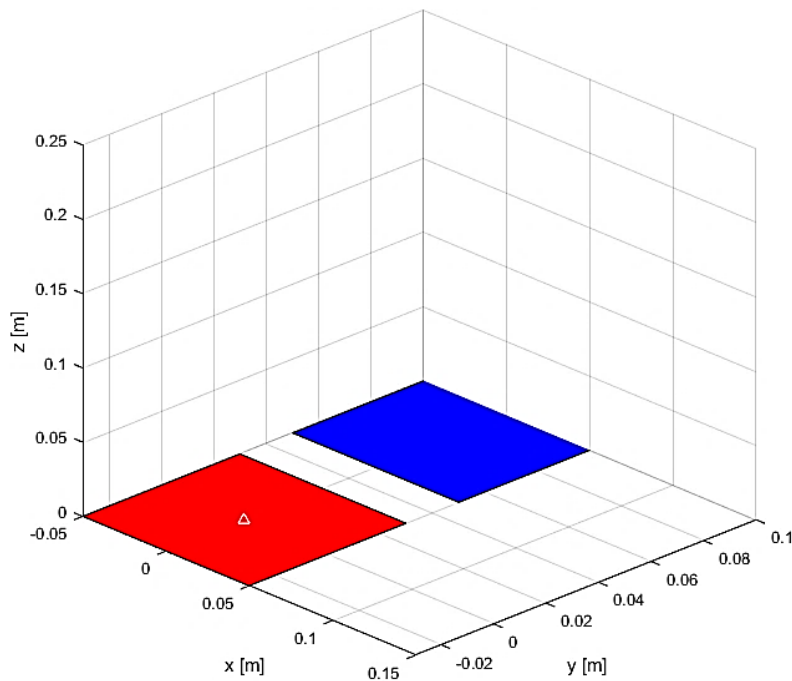


Figura 19. Representación de la posición inicial de los pies en el plano cartesiano.



Es conveniente resaltar que las dimensiones de los polígonos de la figura anterior corresponden a las medidas geométricas del pie del robot real, tal como se plasma en la siguiente tabla.

Dimensión de los pies del robot bípedo Bioloid	
Largo	10×10^{-2} [m]
Ancho	6×10^{-2} [m]

Tabla 2. Dimensión de los pies del robot Bioloid.

En la figura 19 se representa el origen del plano cartesiano (0, 0, 0) mediante el símbolo Δ , el cual coincide con el punto intermedio del pie derecho, que a su vez es representado por el polígono de color rojo. Por su parte el polígono de color azul representa el pie izquierdo ubicado en la coordenada (0, W_p , 0).

A continuación, se establece la trayectoria de cada pie para tres pasos completos de marcha, en este caso la observación principal se encuentra en la fase de soporte simple, en la cual el pie que soporta el peso del robot no avanza, a diferencia el pie contrario es balanceado y este avanza describiendo un arco de amplitud A_p respecto a los ejes X y Z.

El lector debe recordar que estas condiciones iniciales propias del espacio de tareas toman la siguiente forma, tal como se mencionó en las consideraciones previas.

$$\begin{aligned}
 X_o &= [x_o \ y_o \ z_o \ \phi_o \ \theta_o \ \psi_o]^T \\
 X_{RF} &= [x_r \ y_r \ z_r \ \phi_r \ \theta_r \ \psi_r]^T \\
 X_{LF} &= [x_l \ y_l \ z_l \ \phi_l \ \theta_l \ \psi_l]^T
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

La figura siguiente ilustra la trayectoria espacial planeada para ambos pies a partir de puntos característicos de la caminata.

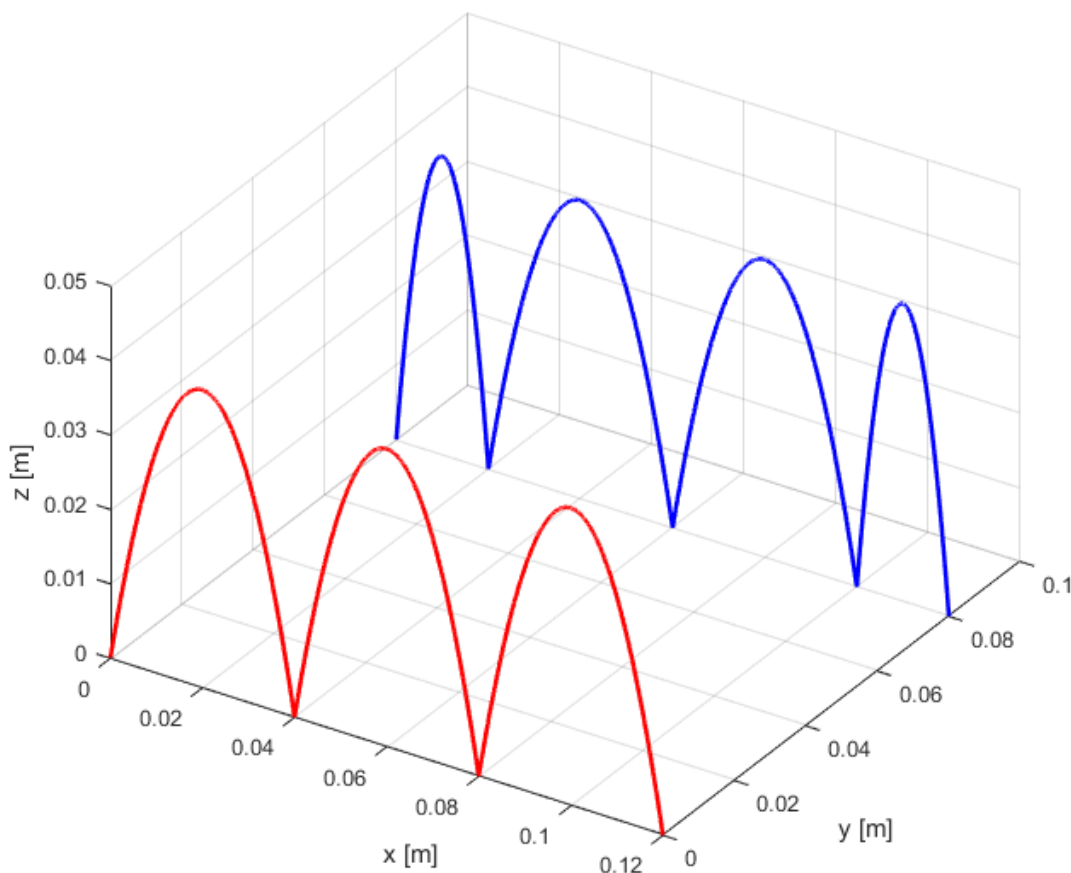


Figura 20. Trayectoria cartesiana descrita por los pies del robot. En color rojo la trayectoria deseada para el pie derecho, y en color azul la trayectoria deseada para el pie izquierdo del robot.

El establecimiento de puntos característicos para los movimientos de los extremos de los pies se hace mediante análisis geométrico de la marcha, sin embargo, es necesario que estos puntos hagan parte de una curva suave que describa el avance de los extremos de los pies, por tanto, los arcos resultantes son creados mediante interpolación por splines cúbicos.

Es notorio que el pie izquierdo ejecuta cuatro arcos, uno más que el pie derecho, adicional a esto los arcos inicial y final de este mismo pie son más angostos que el resto de arcos genéricos exhibidos en la figura 20, esto se debe a que el pie izquierdo inicia y termina la marcha, por lo cual el robot debe preparar el balanceo del CoM suavemente hacia el pie que estará en soporte simple durante el inicio y fin de la caminata. Si los arcos de inicio y fin no se consideran diferentes del resto, el robot realizaría un movimiento brusco de balanceo, puesto que intentaría ubicar el CoM de manera instantánea en la mitad de un paso, es decir ubicar el pie en la mitad de un arco genérico en un tiempo infinitesimal de modo que el robot podría perder el equilibrio.

En la siguiente imagen se observa la evolución de cada trayectoria de referencia sobre el eje X para los extremos de los pies respecto al tiempo de ejecución de la marcha.

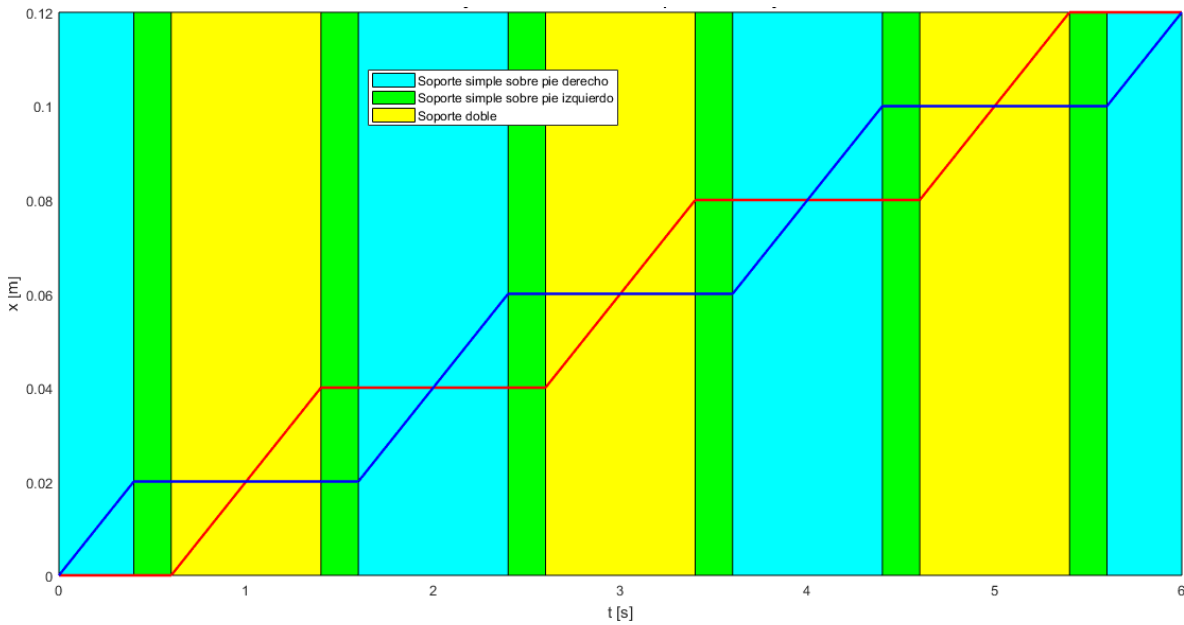


Figura 21. Trayectoria cartesiana sobre el eje X de ambos pies respecto el tiempo.

La franja de color cian representa la fase de soporte simple sobre el pie derecho. La franja de color amarillo representa la fase de soporte simple sobre el pie izquierdo. La franja verde representa fase de soporte doble sobre ambos pies. La línea de color azul representa el movimiento del pie derecho mientras que la línea roja representa el movimiento del pie izquierdo.

En la figura 22, se observa la trayectoria con respecto al tiempo de los extremos de ambos pies respecto al eje Z. Con este gráfico se diseña el levantamiento o despegue de los pies por encima del suelo, también es claro que el levantamiento de un pie en forma de arco se efectúa solamente cuando este se encuentra en fase balanceo lo cual le permite al robot despegar el pie del suelo y al mismo tiempo avanzar sobre el eje X.

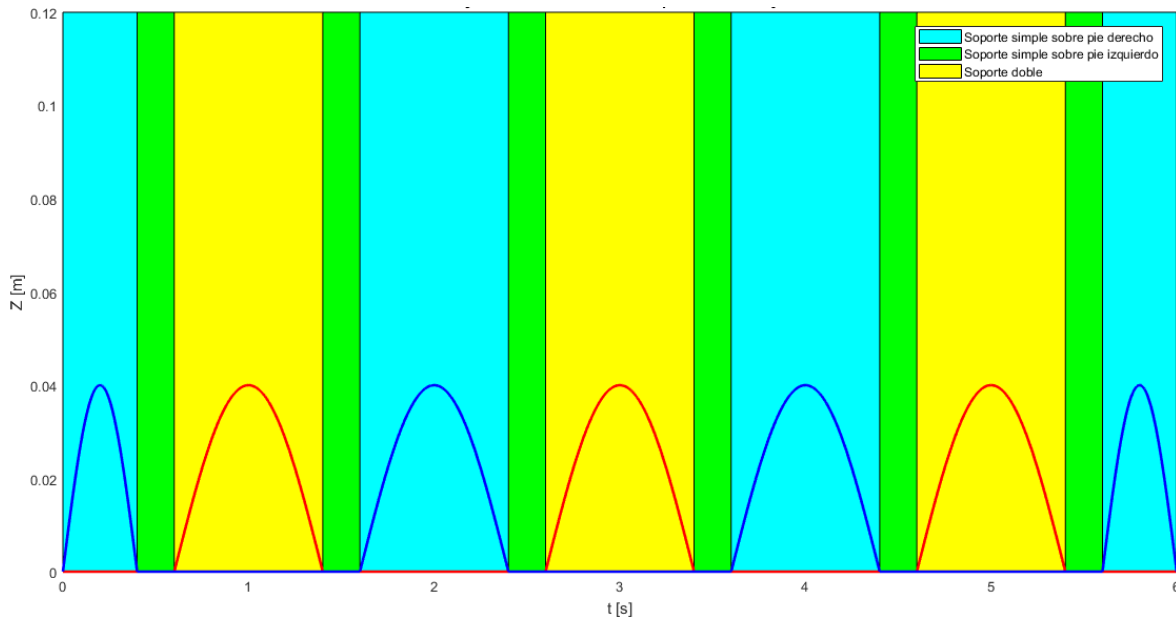
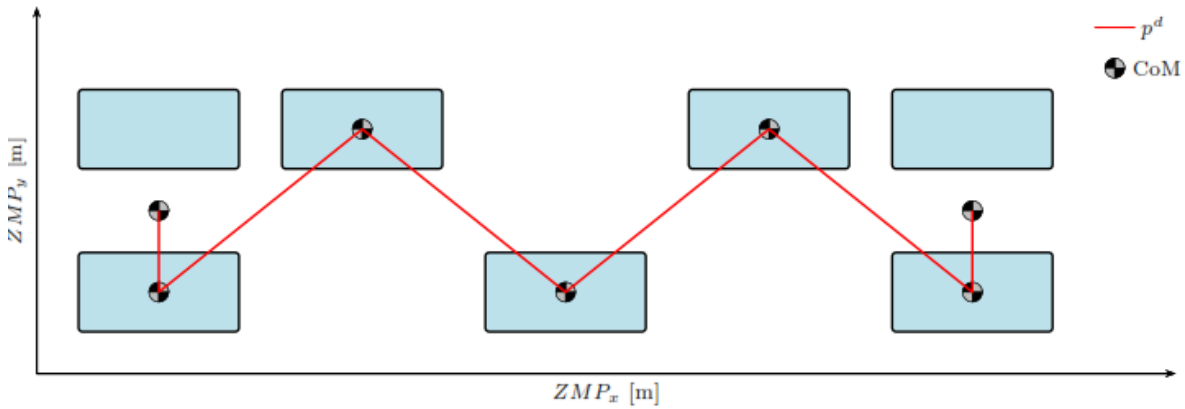


Figura 22. Trayectoria cartesiana sobre el eje Z de ambos pies respecto al tiempo.

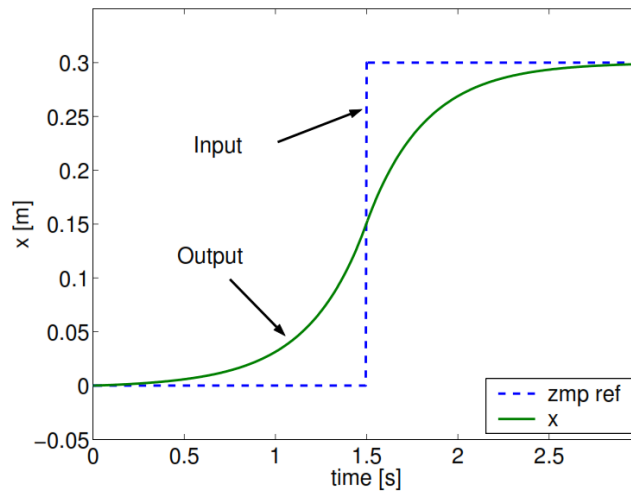
Finalmente, la trayectoria de los pies respecto al eje Y no es ilustrada puesto que la marcha propuesta para la experimentación es unidireccional, lo cual indica que la rotación del pie derecho tendrá un valor constante de cero sobre el eje Y respecto al tiempo, igualmente el pie izquierdo tendrá un valor constante W_p sobre el eje Y respecto al tiempo, de esta manera el robot caminará en línea recta.

III.2. Diseño de las trayectorias del ZMP

A continuación se utiliza información geométrica de los pasos preestablecidos para generar una trayectoria del ZMP deseada, la cual se denotará como $ZMP^d(t) = [P_x^d(t), P_y^d(t)]$, esta trayectoria es producto de la interpolación cúbica de puntos que aporta la proyección del CoM sobre el suelo durante cada zancada del robot. Por ejemplo, en la Figura 23, se ilustra una secuencia de pasos preestablecidos y los puntos de proyección sobre suelo que alcanzaría el CoM de un robot.



(a)



(b)

Figura 23. Trayectoria de referencia del ZMP. (a) Diseño con formas triangulares que unen los puntos que deben alcanzar el ZMP. (b) Trayectoria de referencia del ZMP con formas rectangulares y seguimiento del ZMP real [36].

En este trabajo la trayectoria del ZMP se diseñó de tal manera que el ZMP nunca abandone el polígono de soporte durante cualquiera de las fases de la marcha del robot, lo anterior con el objetivo de garantizar la estabilidad del robot mientras camina.

Los vectores utilizados para el diseño de la trayectoria de ZMP deseado se muestran a continuación, al igual que el vector de tiempo de ejecución para la pareja de coordenadas en (x, y).

$$ZMP_x^d = [0 \ 0 \ 0.02 \ 0.04 \ 0.06 \ 0.08 \ 0.10 \ 0.12 \ 0.12]$$

$$ZMP_y^d = [0.04 \ 0 \ 0.08 \ 0 \ 0.08 \ 0 \ 0.08 \ 0 \ 0.04]$$

$$Tiempo = [0 \ 0.3 \ 1.2 \ 2.1 \ 3 \ 3.9 \ 4.8 \ 5.7 \ 6]$$

En la literatura es común observar que el diseño del ZMP se realice utilizando formas triangulares o rectangulares [36] [70] [66] , tal como se observó en el ejemplo de la figura 23, sin embargo en este trabajo se propone representar la trayectoria referencia mediante polinomios que suavicen la unión entre los puntos de interés, inclusive se pretende que tras la aplicación del ZMP deseado al modelo Cart-Table su salida en este caso la trayectoria de COM del robot sea una señal mucho más fácil de seguir por el algoritmo de control predictivo, por otra parte también se intenta conservar la fluidez de la caminata humana.

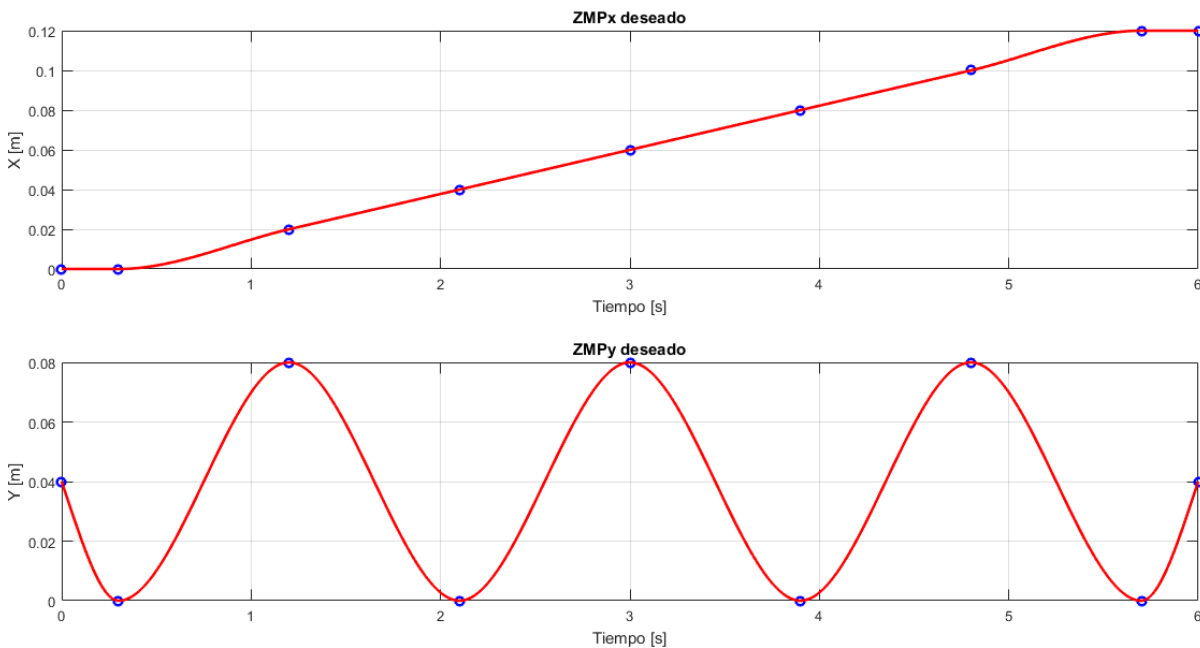


Figura 24. Trayectoria de referencia del ZMP diseñada.

El resultado de la interpolación para la obtención de la trayectoria del ZMP deseado se observa en la línea de color rojo, mientras que los círculos en azul representan el par de coordenadas cartesianas (x, y), que fueron apareadas entre los vectores ZMP_x^d y ZMP_y^d a lo largo del vector de tiempo.

III.3. Modelo Cart-Table (cálculo de la trayectoria del CoM)

El modelo Cart-Table [36] es un modelo mecánico que se aproxima a la dinámica de un robot bípedo. Este es representado por medio de un carro que se desplaza sobre la superficie horizontal de una mesa, tal como se puede ver en la figura 25. La masa M del carro representa la masa total concentrada del robot, y su ubicación representa la posición



del centro de masa del robot, el cual se desliza con aceleración \ddot{x} sobre una mesa con masa nula. Es importante destacar que el polígono de soporte formado en fase de apoyo simple y apoyo doble es representado por la base de sustentación de la mesa. De esta manera cuando el robot se encuentra en fase de soporte simple la base la mesa coincide con la planta del pie de soporte del robot.

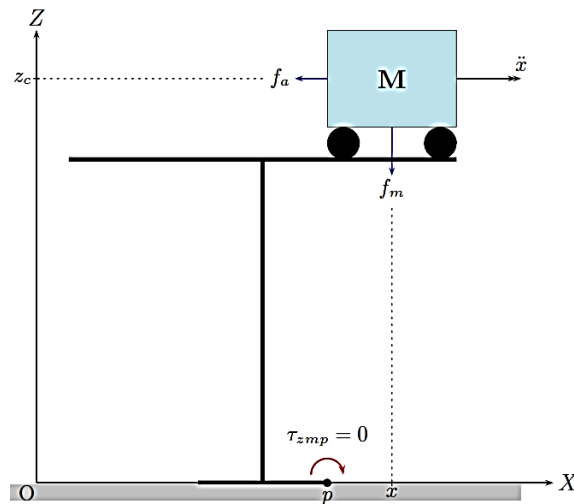


Figura 25. Modelo Cart Table propuesto por Shuuji Kajita.

La aceleración debido a la gravedad de la tierra genera una fuerza de magnitud $F_m = M g$ en sentido opuesto al eje Z. Por otra parte es indispensable mantener constante la altura del CoM en el nivel Z_c por tanto es necesario aplicar una fuerza de magnitud $F_a = m \ddot{x}$ en dirección contraria al movimiento de avance del robot.

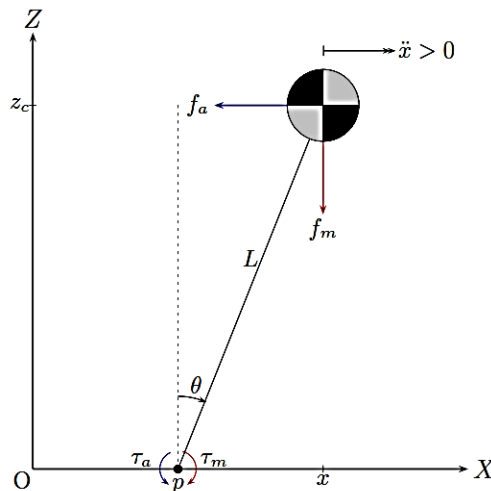


Figura 26. Diagrama de fuerzas ejercidas sobre la masa M.



Las fuerzas F_m y F_a generan un torque resultante con brazo de palanca alrededor del punto p ubicado sobre el eje X . Ilustrando el esquema de fuerzas del sistema propuesto, tal como se observa en la figura 26, se deduce que el momento ejercido por F_m es:

$$\tau_m(p) = L F_m \sin(\theta) \quad (12)$$

$$\tau_m(p) = L F_m \frac{x - p}{L} \quad (13)$$

$$\tau_m(p) = F_m(x - p) \quad (14)$$

Mientras que la fuerza F_a genera el momento:

$$\tau_a(p) = L F_a \cos(\theta) \quad (15)$$

$$\tau_a(p) = L F_a \frac{Z_c}{L} \quad (16)$$

$$\tau_a(p) = F_a Z_c \quad (17)$$

A partir de las ecuaciones (14) y (17) se obtiene que el momento total resultante alrededor del punto p es:

$$\tau(p) = F_m(x - p) - F_a Z_c \quad (18)$$

$$\tau(p) = Mg(x - p) - M Z_c \ddot{x} \quad (19)$$

Existe un punto p donde se cancelan los torques $\tau_m(p)$ y $\tau_a(p)$, se denomina punto de momento cero P_{ZMP} , por lo cual el $\tau(p)$ se hace cero, y el robot no tendrá fuerza alguna que lo desequilibre. De esta forma la ecuación anterior pasa a ser la siguiente.

$$\tau_{ZMP} = 0 = Mg(x - p_{ZMP}) - M Z_c \ddot{x} \quad (20)$$

Puesto que la aceleración del centro de gravedad es la variable de interés del sistema que mantiene en equilibrio al robot, el punto P_{ZMP} con respecto al cual el equilibrio es efectivo, puede ser calculado despejando P_{ZMP} a partir de esta expresión:

$$P_{ZMP} = x - \frac{Z_c}{g} \ddot{x} \quad (21)$$

En seguida se aplica transformación de Laplace a la ecuación anterior, para lo cual se consideran condiciones iniciales iguales a cero. Esto permite obtener la función de transferencia del sistema, que relaciona la salida, en este caso la posición del centro de masa, y la entrada de posición del punto de momento cero.

$$\frac{x(s)}{P_{ZMP}(s)} = \frac{1}{1 - \frac{Z_C}{g} s^2} \quad (22)$$

De la función de transferencia resultante, exactamente al examinar su polinomio característico, se evidencia que posee dos polos reales:

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{g}{Z_C}}$$

Debido a que el polo S_1 está ubicado en el semiplano derecho del plano complejo, se deduce que el sistema es inestable. Indicando que para una entrada limitada del ZMP deseado la salida $x(t)$ resultante diverge. Por consiguiente, se debe solucionar el problema de estabilidad.

Por otro lado, se debe analizar el modelo Cart-Table tanto en el plano sagital como el frontal, así pues, es necesario desacoplar el sistema mostrado en la figura 27, como se muestra en la figura 28.

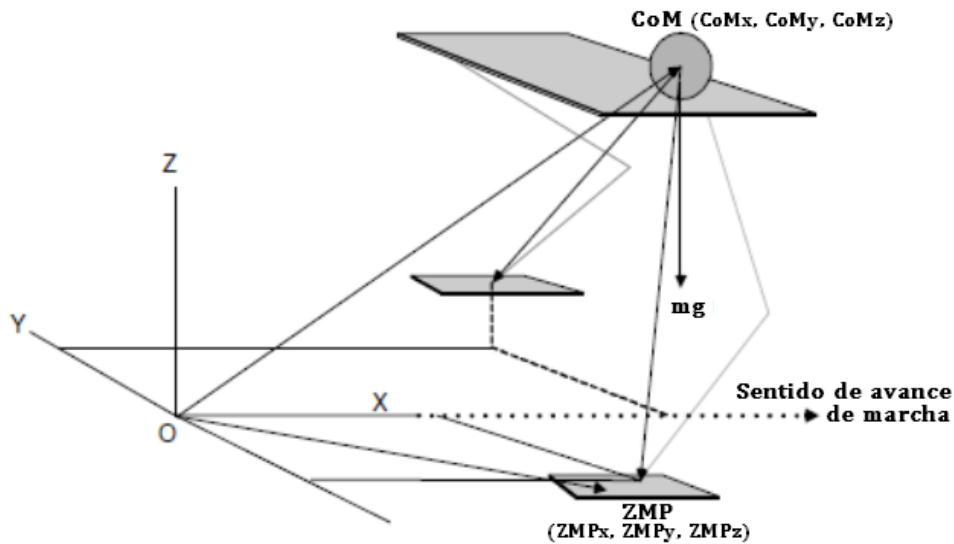


Figura 27. Representación del modelo Cart-Table en el espacio.

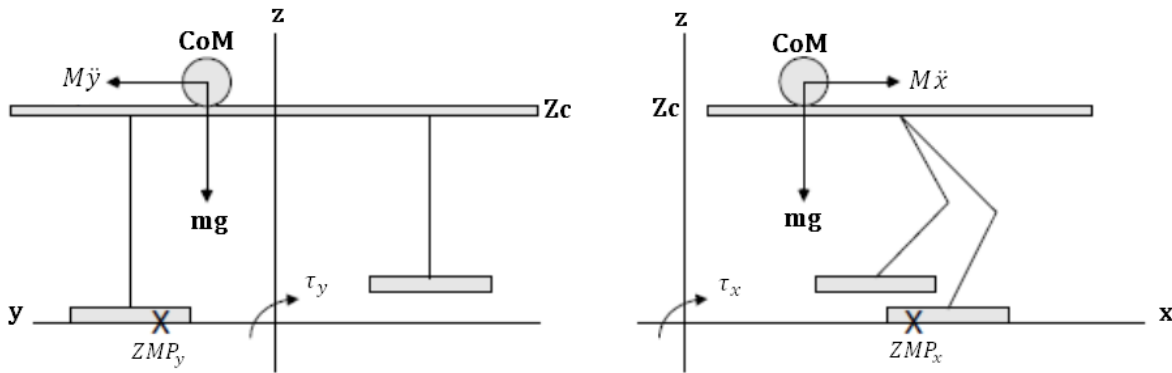


Figura 28. Representación del modelo Cart-Table en el plano frontal y sagital respectivamente [84].

De la imagen anterior se deduce el nuevo sistema de ecuaciones diferenciales que describe el sistema en ambos planos.

$$P_{ZMP_x} = x - \frac{Z_c}{g} \ddot{x} \quad (23)$$

$$P_{ZMP_y} = y - \frac{Z_c}{g} \ddot{y} \quad (24)$$

III.4. Solución del Modelo Cart-Table

De acuerdo con el sistema de ecuaciones anterior, el cual describe el modelo Cart Table sobre el plano (X, Z) como en el plano (Y, Z) y teniendo en cuenta la literatura [36] se procede a controlar el sistema a partir del metodo *Preview Control*. Esta solución considera la aceleración como la variable del sistema que define el punto de equilibrio ZMP, en el cual el momento angular debido al peso es compensado para mantener el equilibrio. Por tanto, considerando la variación de la aceleración del carro con respecto al tiempo, como entrada al sistema de ecuaciones (25), y llevando al sistema a su representación en espacio de estados se obtiene el sistema mostrado a continuación; puesto que el sistema dinámico para X y para Y es el mismo, únicamente cambia la variable de interés, se emplean los términos del sistema CoM y P_{ZMP} indistintamente para referirse a ambos casos.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (25)$$

$$Pzmp = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{Z_c}{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (26)$$

El ZMP resultante es obtenido a partir de un sistema de control predictivo que utiliza información futura de la trayectoria de referencia, el cual ya ha sido mencionado en el párrafo anterior. El diagrama de bloques propuesto para la técnica *Preview Control* es mostrado a continuación.

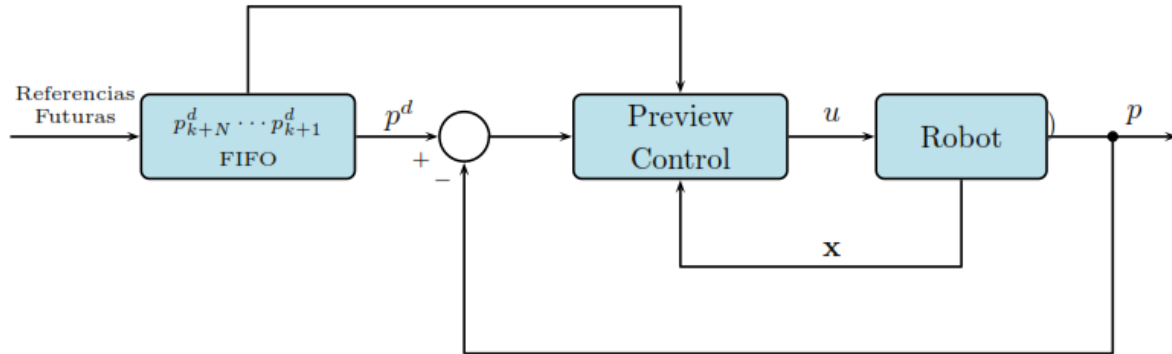


Figura 29. Diagrama de bloques propuesto para la técnica Preview Control.

Para el sistema de ecuaciones (25) es necesario diseñar un servo-controlador discreto, que permite minimizar el índice de desempeño $J(k)$ de la ecuación (27), durante cada instante de muestreo k . Dicho índice consiste de la suma ponderada de dos factores, el primer término penaliza el error de seguimiento mediante la expresión $Q(P_j^d - P_j)^2$. Por su parte el segundo término Ru_j^2 penaliza esfuerzos de control grandes. Por consiguiente, Q y R son coeficientes de ponderación positivos.

$$J(k) = \sum_{j=k}^{\infty} [Q(P_j^d - P_j)^2 + Ru_j^2] \quad (27)$$

Así pues, la ley de control propuesta es:

$$u(k) = -G_i \sum_{i=0}^k e(i) - G_x x(k) - \sum_{j=1}^{N_i} G_p(j) P^d(k+j) \quad (28)$$

Donde,

$$e(i) = p^d(i) - p(i) \quad (29)$$



El esfuerzo de control usado está compuesto por tres elementos principales; la acción integral que busca disminuir el error de seguimiento, la realimentación del vector de estados $x(k)$, y acción de predicción mediante la referencia futura de ZMP $P^d(k + j)$. Donde G_i es la ganancia que multiplica el error de seguimiento del ZMP. G_x es la ganancia de realimentación del vector de estados $x(k) = [x \ \dot{x} \ \ddot{x}]^T$ en el instante k. El tercer elemento está relacionado con la cantidad de muestras futuras N_i de la señal de referencia, en donde $G_p(j)$ es una ganancia variable, denominada ganancia predictiva, la cual depende del número de muestras futuras N_i de la referencia de ZMP. Las referencias futuras son almacenadas en buffer tipo FIFO (First In First Out) ó (primero en entrar primero en salir). El esquema de control implementado Simulink de Matlab es mostrado a continuación.

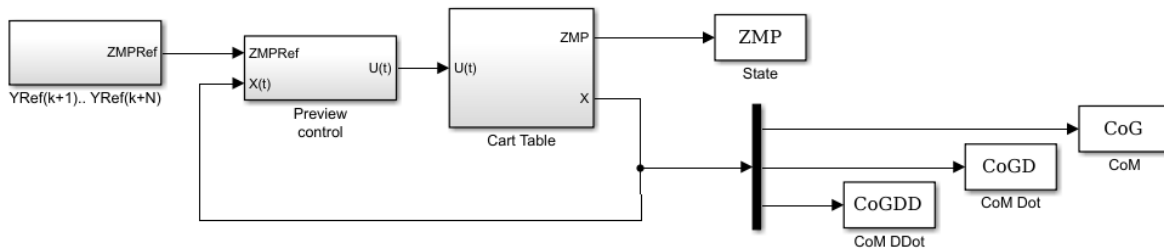


Figura 30. Esquema de control principal implementado en Simulink de Matlab.

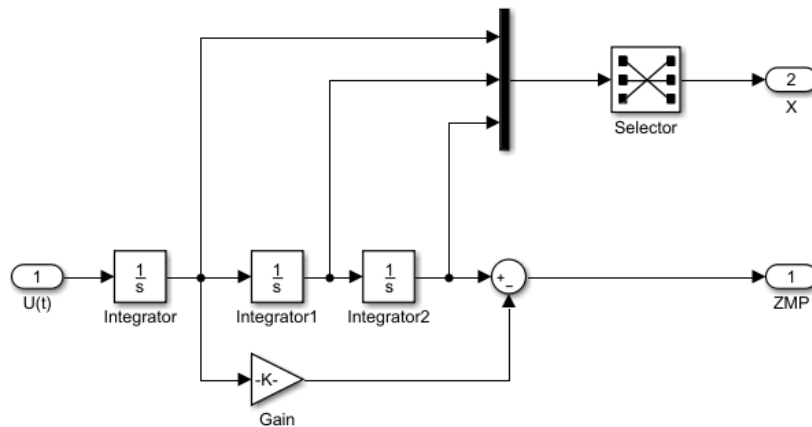


Figura 31. Sistema dinámico Cart-Table implementado en Simulink de Matlab.

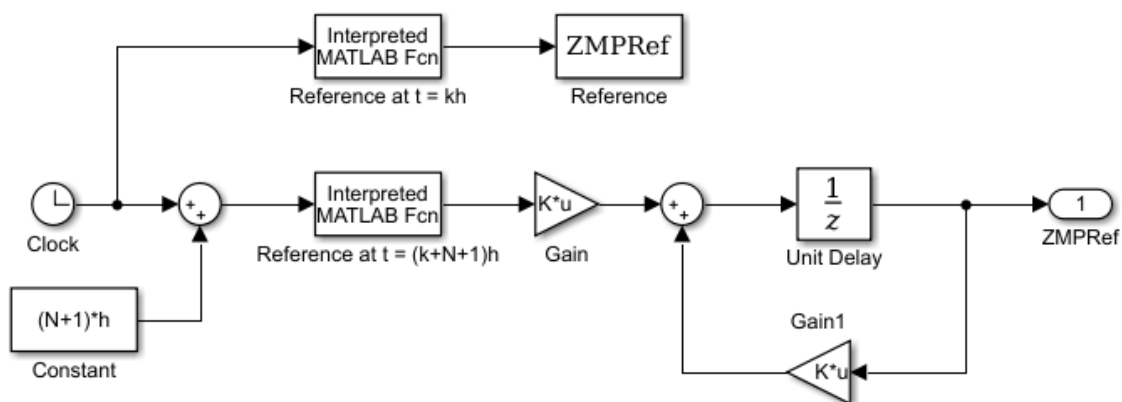


Figura 32. Buffer tipo FIFO implementado en Simulink de Matlab.

Se debe destacar que los algoritmos de control simulados se repiten para plano frontal es decir para la obtención de (ZMP_x, ZMP_z) y (CoM_y, CoM_z) . Por lo cual no se muestran imágenes de los esquemas, sin embargo, si muestran los resultados de seguimiento.

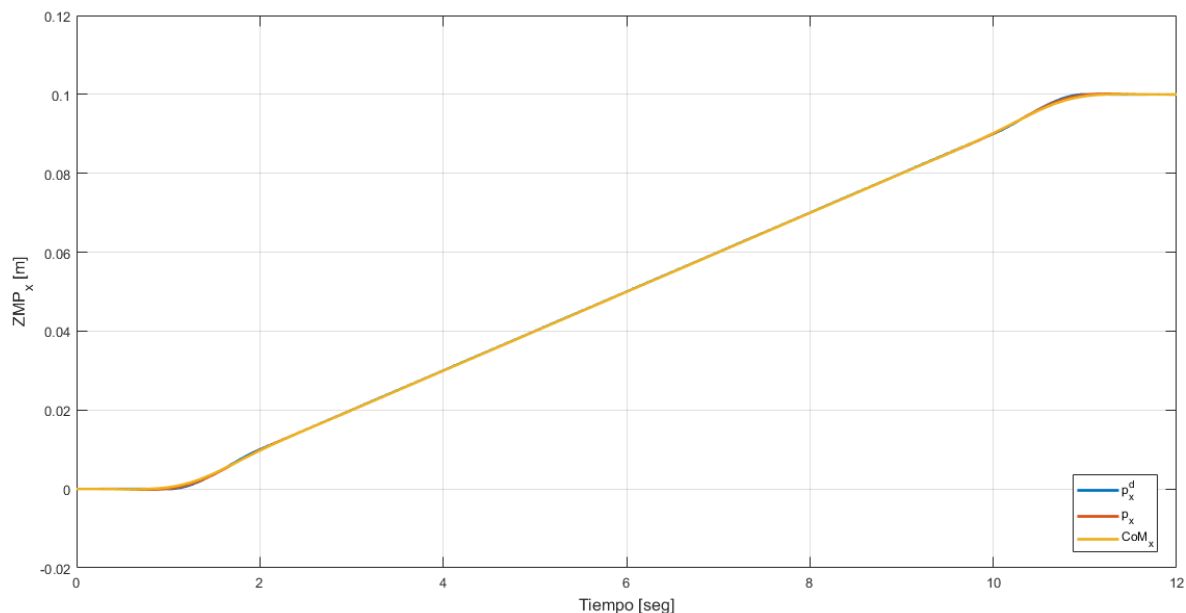


Figura 33. Trayectorias resultantes del ZMP y CoM para el plano sagital.

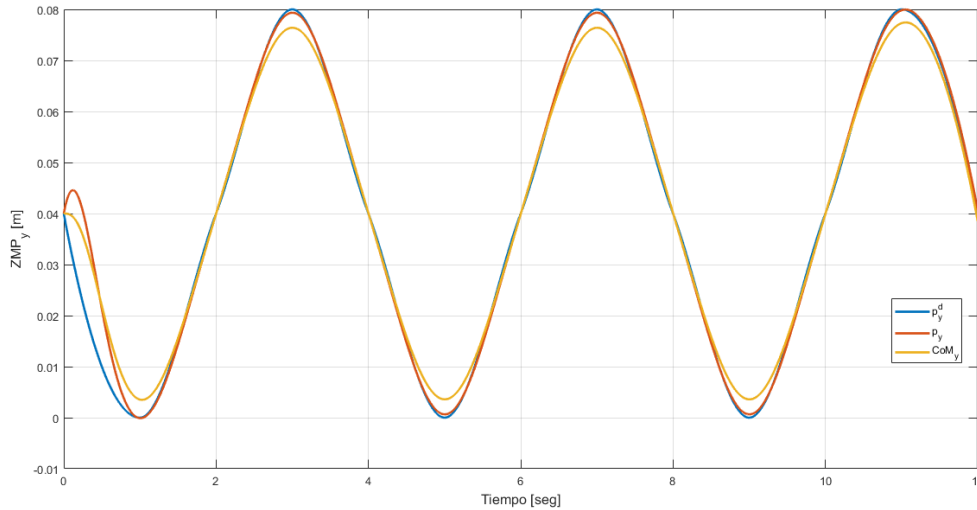


Figura 34. Trayectorias resultantes del ZMP y CoM para el plano frontal.

Efectivamente tras el resultado de las simulaciones se observa el correcto seguimiento del esquema de control tanto para el ZMP en plano (X, Z), como para el ZMP en el plano (Y, Z).

Finalmente queda para la etapa posterior permitir que el marco de referencia cero, asociado al cuerpo cero del robot (tronco, cabeza y brazos) siga el movimiento del CoM obtenido mediante el algoritmo de Preview Control en el espacio de tareas, es decir posición y orientación, al mismo tiempo que los pies siguen sus trayectorias de referencia en el plano de tareas, esto es posición y orientación, los cuales deben ser ejecutados a medida que se balancea el CoM. Sin embargo hay un paso previo que consiste en convertir estas trayectorias de referencia cartesianas en trayectorias articulares $Qd(t)$ aptas para el robot real, lo cual se logra mediante la solución de la cinemática inversa del robot bípedo Bioloid. Por su parte la cinemática inversa fue abordada por medio de la obtención del modelo geométrico inverso, presentado en los anexos de este proyecto.

Las trayectorias articulares para cada junta que pertenece a los miembros inferiores del robot son denotas por la letra Q_i donde $i \in \{7, 8, \dots, 17, 18\}$, el identificador i es dado de acuerdo con la ID propio que se asigna a los motores de las piernas, siendo así que los articulaciones del pie derecho poseen numeración impar, y por el contrario las articulaciones del pie izquierdo poseen numeración par.

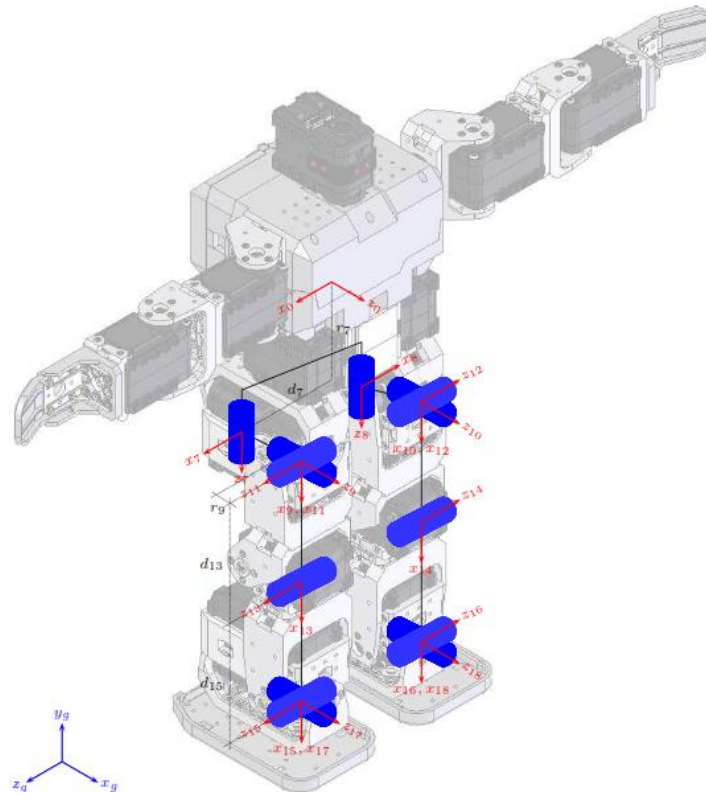


Figura 35. Disposición articular del robot bípedo Bioloid.

Las trayectorias articulares obtenidas en la simulación del generador de patrones de marcha utilizando el modelo Cart Table es presentado a continuación.

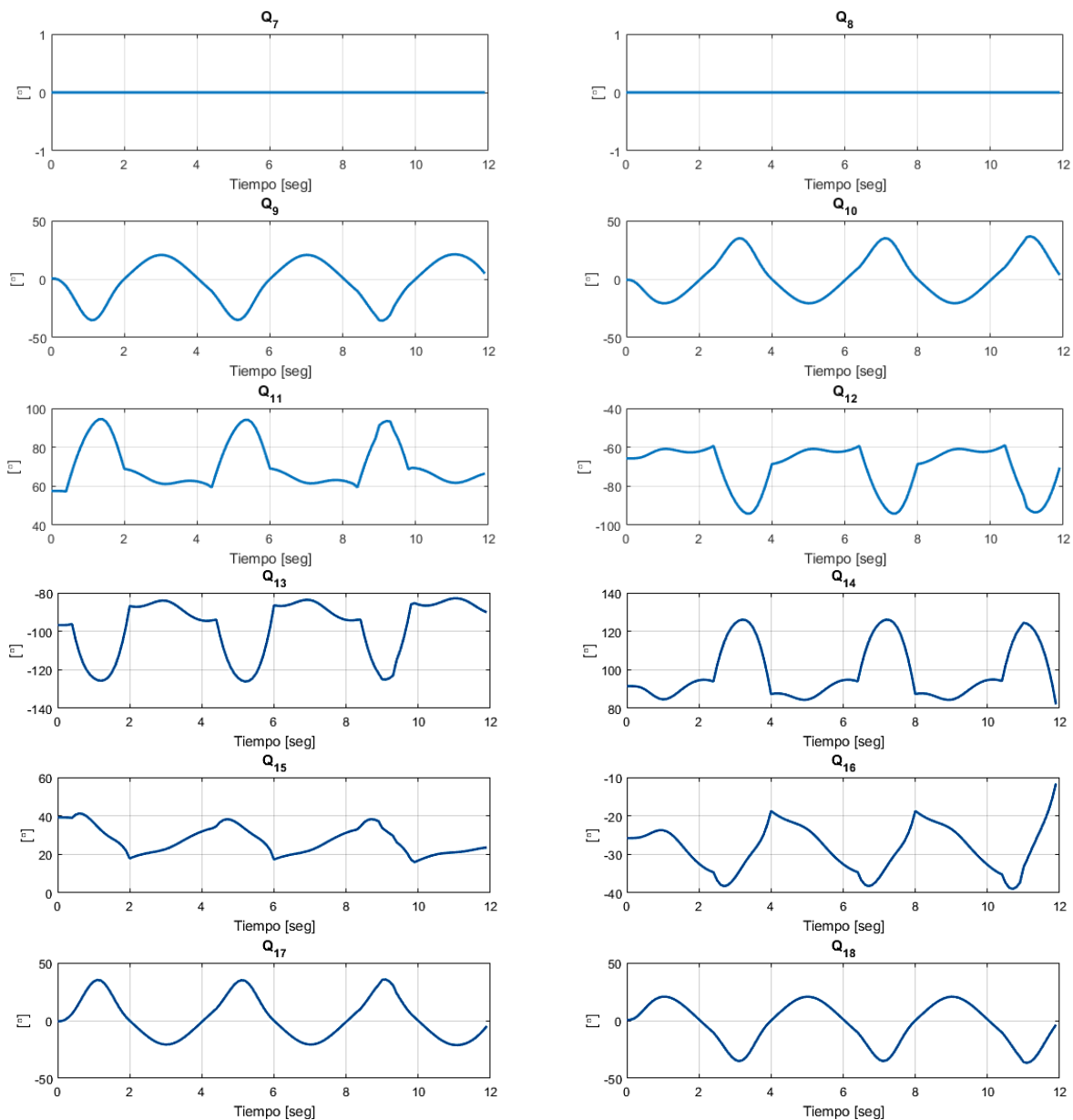


Figura 36. Trayectorias articulares de marcha mediante modelo Cart Table y el indicador de estabilidad ZMP.

Las trayectorias articulares Q_7 y Q_8 permiten realizar movimientos de rotación de la cadera en plano transversal, Q_9 y Q_{10} corresponden a la aducción de la cadera, Q_{11} y Q_{12} permiten ejecutar flexión y extensión de la cadera.

Asimismo, las trayectorias articulares restantes Q_{13} y Q_{14} realizan flexión extensión de la rodilla, Q_{15} y Q_{16} corresponden a la dorsiflexión del pie, mientras que Q_{11} y Q_{12} se encargan de ejecutar el giro vertical de los pies.



De esta forma termina el capítulo III, el cual presentó el diseño del primer generador de patrones de marcha para robots bípedos de esta investigación, el cual se basó en el modelo simplificado Cart Table y el punto de momento cero, propuesto por Shuuji Kajita. Para el siguiente capítulo se diseña el segundo generador de patrones estudiado.



Capítulo IV: Generación de Trayectorias de Marcha Mediante Minimización de Energía Mecánica

En esta parte del proyecto se utiliza el método de generación de trayectorias de marcha óptima para robots bípedos propuesto en [31], y su implementación se realiza sobre el robot bípedo Bioloid al igual que en el capítulo anterior. A diferencia del método Cart-Table aquí se debe encontrar una solución a partir del modelo dinámico completo del robot, y la minimización de un índice de desempeño en términos de consumo energía, que se debe relacionar con un ciclo de marcha estable.

El problema de optimización consiste en encontrar un vector de funciones en el tiempo para la posición $q(t)$, la velocidad $\dot{q}(t)$ y la aceleración $\ddot{q}(t)$, que establezcan movimientos articulares de referencia deseados para la marcha del robot, lo cual se logra con el establecimiento de un índice de desempeño [26]. Este índice reside en una función de costo la cual podrá ser minimizada o maximizada según sea su naturaleza matemática, asimismo el problema de optimización debe satisfacer condiciones dinámicas y cinemáticas impuestas por el diseñador, las cuales son formuladas mediante restricciones matemáticas de igualdad y restricciones de desigualdad. Cabe reiterar que a diferencia del generador de patrones propuesto por Kajita del capítulo anterior, aquí es indispensable el modelo dinámico propio del robot, mostrado a continuación.

$$A(q)q_a + H(q, q_v) = B\Gamma + J_r^T(q)F_r + J_l^T(q)F_l \quad (30)$$

De la ecuación anterior $q \in \mathbb{R}^{18}$ el cual es un vector que contiene las 12 posiciones articulares que representan los pies robot, y además contiene la posición y orientación del sistema (x_0, y_0, z_0) del robot, con respecto al marco de referencia inercial (x_g, y_g, z_g) .

$$q = [x_0^g \quad y_0^g \quad z_0^g \quad \Phi \quad \theta \quad \psi \quad q_7 \quad \dots \quad q_{18}]^T \quad (31)$$

Los vectores q_v y q_a corresponden al vector de velocidad y aceleración respectivamente. La matriz $A \in \mathbb{R}^{18 \times 18}$ representa la matriz de inercia del robot. $H \in \mathbb{R}^{18}$ es el vector de fuerzas centrífugas, gravitacionales y de Coriolis. $B \in \mathbb{R}^{18 \times 12}$ Es una matriz que contiene únicamente unos y ceros. $\Gamma \in \mathbb{R}^{12}$ Es el vector de torques aplicado a las articulaciones del robot. El producto $B\Gamma$ cumple la siguiente igualdad.

$$B\Gamma = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ \Gamma \end{bmatrix}$$



$J_r \in \mathbb{R}^{6 \times 18}$ Es la matriz que permite expresar las velocidades lineales y angulares del pie derecho con respecto al suelo, igual función cumple $J_l \in \mathbb{R}^{6 \times 18}$ para el pie izquierdo.

Los vectores F_r y F_l contienen las fuerzas y momentos de reacción generados por el contacto de los pies con el suelo. Por ejemplo, si el pie izquierdo no está contacto con el suelo F_l se considera cero para esa fase de marcha.

Otras consideraciones para implementar este método de generación de trayectorias de marcha son las siguientes:

- ✓ El robot se desplaza sobre una superficie plana y horizontal.
- ✓ Los movimientos realizados por el pie derecho son idénticos a los realizados por el pie izquierdo. Sin embargo, existe un desfase, es decir mientras el pie izquierdo esta fase de soporte simple, el pie derecho estará en fase de oscilación.
- ✓ Existe un momento de soporte doble.
- ✓ La velocidad y aceleración de aterrizaje es cero, por tanto, el modelo de impacto contra el suelo no es tenido en cuenta para este proyecto.

El proceso para la generación de trayectorias marcha de acuerdo con [26], [31] y [73] para la aplicación del método de optimización se puede realizar en tres pasos, que serán descritos a continuación.

IV.1. Establecimiento del Índice de Desempeño y las Restricciones Matemáticas de Marcha

De acuerdo con Chevallereau y Aoustin [31], en los motores eléctricos de un robot bípedo gran parte de la energía eléctrica suministrada a estos, es transformada en energía térmica debido a la fricción generada entre los elementos que componen la caja reductora. Por otra parte, está el efecto Joule, que igualmente genera calentamiento de los bobinados del motor. Entonces en términos de energía, un criterio de optimización válido para este enfoque consiste en establecer un índice de desempeño que permita minimizar el consumo de energía mecánica y las pérdidas de energía que serían aquellas transformadas en calor.

Para el método de optimización se han planteado dos índices de desempeño comúnmente usados que minimizan el consumo de energía mecánica. La naturaleza de estos índices se puede analizar por medio del siguiente diagrama.

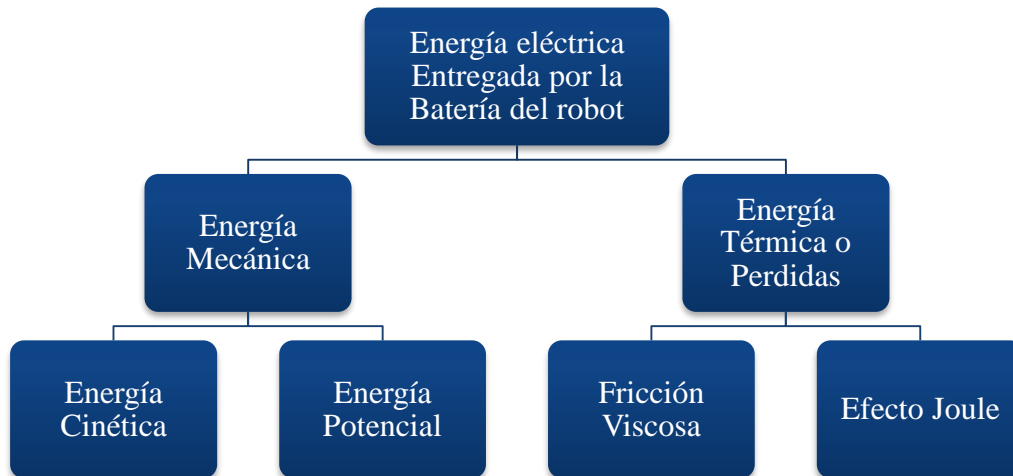


Figura 37. Diagrama de transformación de la energía eléctrica del robot Bioloid.

En la batería del robot se encuentra almacenada la energía eléctrica entregada a los motores de las articulaciones, la cual sufre dos tipos de transformación, la primera de ellas es la transformación de energía eléctrica a energía mecánica evidenciada en los torques de los actuadores, esta a su vez se divide en energía cinética reflejada en el desplazamiento del robot y en energía potencial reflejada en el mantenimiento de la altura del CoM del robot. Inclusive si se es más rigurosa esta primera clasificación también se podría pensar en la energía eléctrica que se transforma en ondas sonoras, debido al estrujamiento de la caja reductora y el impacto de los pies del robot con el suelo.

Esta primer sub-división en la transformación de la energía da paso a un primer índice de desempeño para el método de optimización que tiene como propósito disminuir el consumo energético mediante la minimización de la potencia mecánica, calculada como la integral con respecto al tiempo del valor absoluto del producto punto entre el vector de torques y el de velocidades articulares.

$$J_1(q) = \int_0^T |\Gamma(q) * \dot{q}(t)| dt \quad (32)$$

Este índice de desempeño muestra que el producto entre el torque y la velocidad para el primer y tercer cuadrante es positivo, es decir la energía es consumida por el motor, puesto que el flujo de energía se da desde la batería hacia los motores. A diferencia del segundo y cuarto cuadrante el producto torque por velocidad es negativo, sugiriendo que esta energía es entregada por el motor hacia la batería, lo cual nunca sucede y por el contrario se pierde.



Debido a este problema otros autores [29] han propuesto modificar este índice de desempeño por el siguiente.

$$J_1(q) = \int_0^T \max[\Gamma(q) * \dot{q}(t), 0] dt \quad (33)$$

Esta modificación solo tiene en cuenta la energía consumida por los motores del robot, es decir para cuando el producto torque por velocidad es mayor a cero.

Por otra parte, la energía eléctrica de la batería también se transforma en energía térmica o perdida de energía dentro de los motores por acción del calor, esta clase de energía se produce por la fricción viscosa producto del rozamiento de los engranajes internos del motor y también producto del efecto Joule que calienta el bobinado del motor. Este último efecto da paso a un segundo índice de desempeño para el método de optimización. Este consiste en la integral con respecto al tiempo del cuadrado de la suma de las torques aplicadas a las articulaciones.

$$J_2(q) = \int_0^T \Gamma^T(q) * \Gamma(q) dt \quad (34)$$

Cabe aclarar que este índice es válido solo si se puede garantizar una relación lineal entre la corriente de armadura del motor y el torque de salida del mismo. Es decir, solo sí;

$$\Gamma(q) = k * i(t) \quad (35)$$

Este segundo índice está relacionado con la minimización de las pérdidas de energía asociadas al efecto Joule y no toma en cuenta las pérdidas de energía en calentamiento por fricción.

El lector también debe tener en cuenta que este trabajo se enfoca en comparar dos técnicas de marcha, y una de estas es basada en la minimización del consumo de energía. Por este motivo el índice a utilizar es $J_2(q)$ que toma en cuenta la energía mecánica y las pérdidas de energía por efecto Joule pretendiendo que esto se refleje sobre el consumo de energía eléctrica. Igualmente se debe tener en cuenta que la obtención del vector de torques involucrado en el índice de desempeño $j_2(q)$ es calculado mediante el modelo dinámico inverso del robot.

Una vez establecido en criterio matemático a optimizar, es cuestión de imponer las restricciones de marcha para el problema de optimización. Estas son:

- ✓ La componente de la fuerza de reacción $F_{rn} \in \mathbb{R}$ ejercida por el suelo sobre el pie de apoyo debe ser mayor a cero.
- ✓ La fuerza tangencial $F_{tn} \in \mathbb{R}^2$ debe permanecer en el interior del cono de fricción, para evitar que el pie en apoyo se deslice.
- ✓ Cada articulación debe mantenerse dentro del rango $[-\Gamma_{\max}, \Gamma_{\max}]$ es decir restringir el tope superior e inferior hasta el valor dado por el fabricante de los motores dynamixel AX12 los cuales pueden entregar hasta 15 kg/cm.
- ✓ Las posiciones y las velocidades de inicio y fin para cada paso, deben ser simétricas de esta forma se aseguran movimientos de marcha continuos.
- ✓ La amplitud del arco que describe el pie que se encuentra en fase de balaceo es de 0.02 m con respecto al suelo.
- ✓ El ZMP debe permanecer siempre dentro del polígono de soporte, bien sea para fase de soporte simple como en fase de soporte doble. En la imagen siguiente se ilustra un ejemplo de esta situación, en donde φ_i es un vector de posición que parametriza la distancia a lo largo de cada lado del polígono de soporte, mientras que r_i es un vector que representa la ubicación del ZMP desde cada uno de los vértices del polígono de soporte. Finalmente n_z es un vector unitario sobre el eje Z.

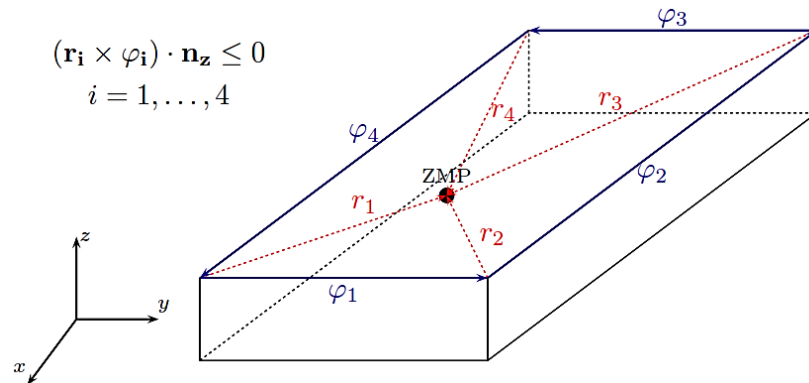


Figura 38. Ubicación del ZMP dentro del polígono de soporte.

De acuerdo a lo expuesto en párrafos previos el problema de optimización se condensa en minimizar el índice:

$$J(q) = \int_0^T \Gamma^T(q(t)) * \Gamma(q(t)) dt \quad (36)$$



El cual está sujeto a las restricciones matemáticas de marcha:

$$\begin{aligned}
 F_{rn}(t) &\geq 0 & 0 \leq t \leq T \\
 |F_{tn}(t)| &\leq \mu \cdot F_{rn}(t) & 0 \leq t \leq T \\
 |\Gamma_i(t)| &\leq \Gamma_i^{max} & 0 \leq t \leq T \\
 q(t) &= E \cdot q(0) & (37) \\
 A_{H_{RF}} &\geq 0.02 & \text{y} & A_{H_{LF}} \geq 0.02 \\
 (r_i \cdot \varphi_i) &\leq 0 & i = 1, \dots, 4
 \end{aligned}$$

Siendo E una matriz con la forma:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix}
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0
 \end{bmatrix}$$

El problema de optimización descrito por (36) corresponde a uno de cálculo de variaciones, en el cual la incógnita del problema es un vector de funciones del tiempo. En el presente contexto, tal problema es muy complejo de resolver y para simplificarlo se transformará en uno de optimización clásica donde la incógnita es un vector. En este caso dicho vector contiene los parámetros que definen las posiciones articulares $q(t)$ del robot. Por este motivo y a diferencia del trabajo consultado en [31], en cual se utilizan funciones polinomiales que describen las posiciones angulares $q(t)$, En este proyecto se usarán series de Fourier truncadas compuestas de un pequeño número de armónicos. La principal razón radica en que la marcha humana es un proceso periódico con características de fluidez y suavidad en los movimientos. Por tanto se utilizarán funciones preestablecidas de la



expansión en series de Fourier y el problema de optimización básicamente consiste en hallar los coeficientes de Fourier [73].

IV.2. Parametrización de las Trayectorias Articulares de Marcha Mediante Expansión en Series de Fourier

La serie de Fourier es una serie infinita que converge a una función periódica y continua. Cualquier función $f(x)$ que sea periódica, integrable y definida entre $[-\pi, \pi]$, puede ser expresada como una suma infinita de funciones seno y coseno [85] [86]. Esto es:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n x) + b_n \sin(n x) \quad (38)$$

Si se desea representar las trayectorias articulares $q(t)$ mediante expansión en series de Fourier, su forma general sería.

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(n w_0 t) + b_n \sin(n w_0 t) \quad (39)$$

Donde, $w_0 = 2\pi/T$ [rad/s] es la frecuencia fundamental de $q(t)$ y a_0, a_n, b_n son los coeficientes de Fourier. Para obtener los coeficientes de Fourier en cada representación articular se establece la siguiente relación.

$$q(t) = \varphi(t)^T \theta \quad (40)$$

Dónde:

$$\varphi(t) = [1 \cos(w_0 t), \dots, \cos(n w_0 t) \sin(w_0 t), \dots, \sin(n w_0 t)]^T$$
$$\theta = [a_0 \ a_1, \dots, a_n \ b_1, \dots, b_n]^T$$

$\varphi(t)$ es un vector que aloja la estructura de la expansión en series de Fourier, mientras que θ es el vector contenedor de los coeficientes de Fourier. De esta manera se pretende representar las trayectorias articulares $q(t)$ mediante expansión en series de Fourier, utilizando los N primeros términos de la serie.

IV.3. Solución del Problema de Optimización

Los métodos con funciones de penalización son bastante utilizados en programación no lineal, la idea principal de los métodos de penalización radica en llevar un problema de



optimización condicional a un problema de optimización sin restricciones [87]. Esta técnica requiere una solución inicial tipo semilla que sea acorde a los factores de penalización, es decir iniciar con una solución medianamente buena.

El problema de optimización presentado en párrafos anteriores ahora se transforma en:

$$\min V(\theta) = J(\theta) + P_b(H(q, \dot{q}, \ddot{q})) + p_u(G(q, \dot{q}, \ddot{q})) \quad (41)$$

Ahora V es la nueva función a minimizar, sin embargo, esta incluye el índice de desempeño $J(\theta)$ propuesto al inicio de este capítulo, como también las denominadas penalizaciones, definidas por las funciones P_b y P_u que corresponden respectivamente a las igualdades y a las desigualdades matemáticas descritas por (37). $H(q, \dot{q}, \ddot{q})$ es una función vectorial cuyos elementos son iguales a cero si se satisfacen todas las restricciones bilaterales durante un ciclo de marcha completo. Las restricciones bilaterales están relacionadas con la orientación de los pies y la simetría de la marcha. Por su parte $G(q, \dot{q}, \ddot{q})$ es una función de valor vectorial cuyos componentes son menores a cero cuando se cumplen todas las restricciones unilaterales. Asimismo, las restricciones unilaterales están relacionadas con las fuerzas de reacción, la condición de no deslizamiento, la saturación de actuadores y el ZMP.

P_b será igual a cero si todos los componentes de H son cero. Si uno solo de los elementos de H es distinto de cero, P_b tiende a un valor grande. En Matlab esta parte del proyecto fue implementada de la siguiente forma:

```
% Penalties for the problem equalities
function [PEq] = penalty_eq(Eq)
    Eq = max(abs(Eq) - (1E-1), 0);
    PEq = 1E6 * sum( exp(10*abs(Eq)) - 1);
end
```

Mientras que P_u será igual a cero si todos los elementos de G son menores que cero. Si alguno de los elementos de G no cumple la condición, P_u tomará un valor muy grande. En Matlab esta penalización está representada por medio de la siguiente estructura.

```
% Penalties for the problem inequalities
function [PIneq] = penalty_ineq(InEq)
    PIneq = 1E10 * sum( exp(100*max(InEq, 0)) - 1);
end
```

En efecto las funciones de penalización P_b y P_u tenderán a cero si las restricciones son satisfechas, intentando que la nueva función de desempeño se minimice. Por el contrario,



tomarán valores grandes para cuando las restricciones son violadas, esto permite que el algoritmo halle un mínimo local, y que la minimización no dependa exclusivamente de $J(\theta)$, sino que también este se altere si las restricciones impuestas para la marcha son vulneradas.

Teniendo en cuenta que el algoritmo de optimización es bastante lento al ejecutarse en una computadora hasta obtener una solución adecuada y que las posiciones articulares durante la marcha para ambos pies son simétricas, aunque con desfase en el tiempo. Se puede afirmar que la configuración articular de la pierna derecha en los pasos impares debe ser igual a la configuración de la pierna izquierda en los pasos pares. De esta manera el cálculo de las trayectorias se hace para un solo paso y se establecen las relaciones.

$$\begin{aligned}
 q_7(t + T) &= -q_8(t) & q_{11}(t + T) &= -q_{12}(t) & q_{15}(t + T) &= -q_{16}(t) \\
 q_8(t + T) &= -q_7(t) & q_{12}(t + T) &= -q_{11}(t) & q_{16}(t + T) &= -q_{15}(t) \\
 q_9(t + T) &= -q_{10}(t) & q_{13}(t + T) &= -q_{14}(t) & q_{17}(t + T) &= -q_{18}(t) \\
 q_{10}(t + T) &= -q_9(t) & q_{14}(t + T) &= -q_{13}(t) & q_{18}(t + T) &= -q_{17}(t)
 \end{aligned}$$

Si se observa con detenimiento en las ecuaciones anteriores para el tiempo $t = 0$ se obtiene que las posiciones articulares iniciales están definidas por las posiciones articulares finales, es decir:

$$q_b(T) = E q_b(0)$$

De esta manera los pasos durante la marcha pueden ser repetidos n veces según las pruebas lo requieran.

También es necesario contar con algunos parámetros de marcha involucrados en la solución del problema de optimización mediante la simulación dinámica del robot. Entre estos se encuentra el tiempo del paso $T_p = 2$ s, la longitud del paso $L_p = 0.04$ m y el número de armónicos de la serie de Fourier $N = 5$. En esta última parte se llevó a cabo un pequeño análisis para la cantidad de armónicos a usar de acuerdo con el índice de desempeño original. En la tabla siguiente se muestra el valor exacto para $J(\theta)$ con diferente cantidad de armónicos.

Numero de armónicos	$J(\theta) [Nt^2 \cdot m^2]$
1	2.07170
2	2.07251
3	2.07371



4	2.07217
5	2.07221

Tabla 3. Índice original $J(\theta)$ en función del número de armónicos para las trayectorias de referencia articular.

De acuerdo con los datos de la tabla anterior a simple vista se podría inferir que a mayor cantidad de armónicos en las trayectorias de referencia el valor de $J(\theta)$ aumenta, sin embargo las diferencias porcentuales de energía entre el valor más alto de armónicos y el más bajo son inferiores al 0.01%, lo cual muestra que estas diferencias no son significativas y al parecer el consumo es aproximadamente constante. Igualmente se debe tener en cuenta que la solución al problema de optimización mediante funciones de penalización no es una solución óptima global [87], en realidad la solución puede ubicarse en un mínimo local.

De igual forma para este proyecto el problema de optimización se resuelve para trayectorias con cinco armónicos. La siguiente imagen muestra los resultados de las trayectorias de referencia articular obtenidas a nivel de simulación en Matlab.

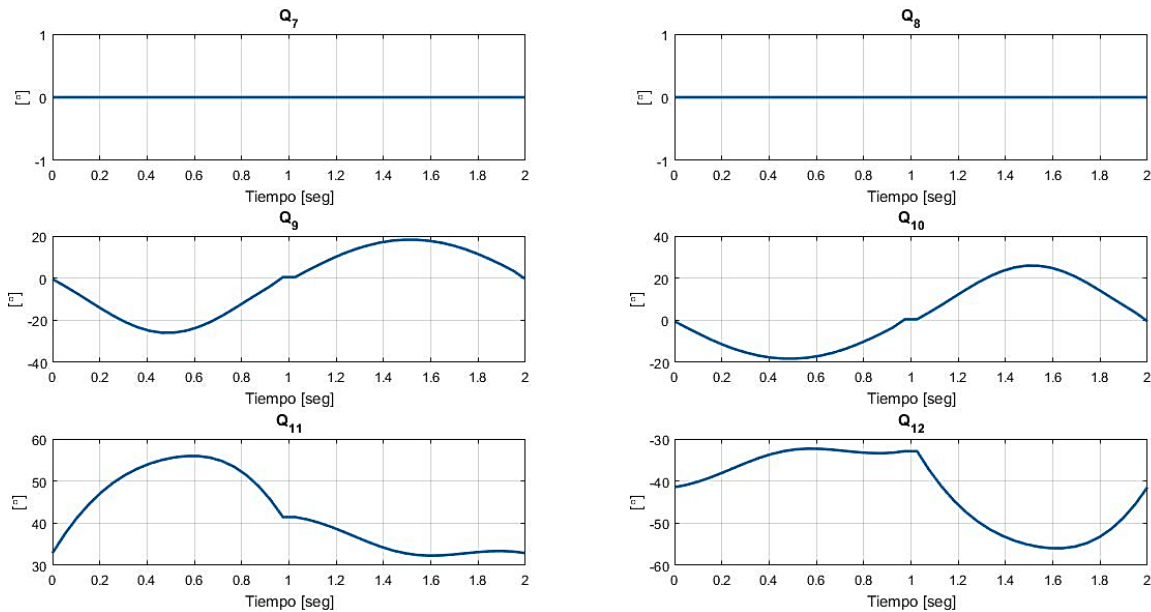


Figura 39. Trayectorias Articulares de la marcha obtenidas mediante optimización. Q_7 y Q_8 corresponden a la rotación de la cadera en el plano transversal, Q_9 y Q_{10} corresponden a la aducción de la cadera, Q_{11} y Q_{12} corresponden a la flexión-extensión de la cadera.

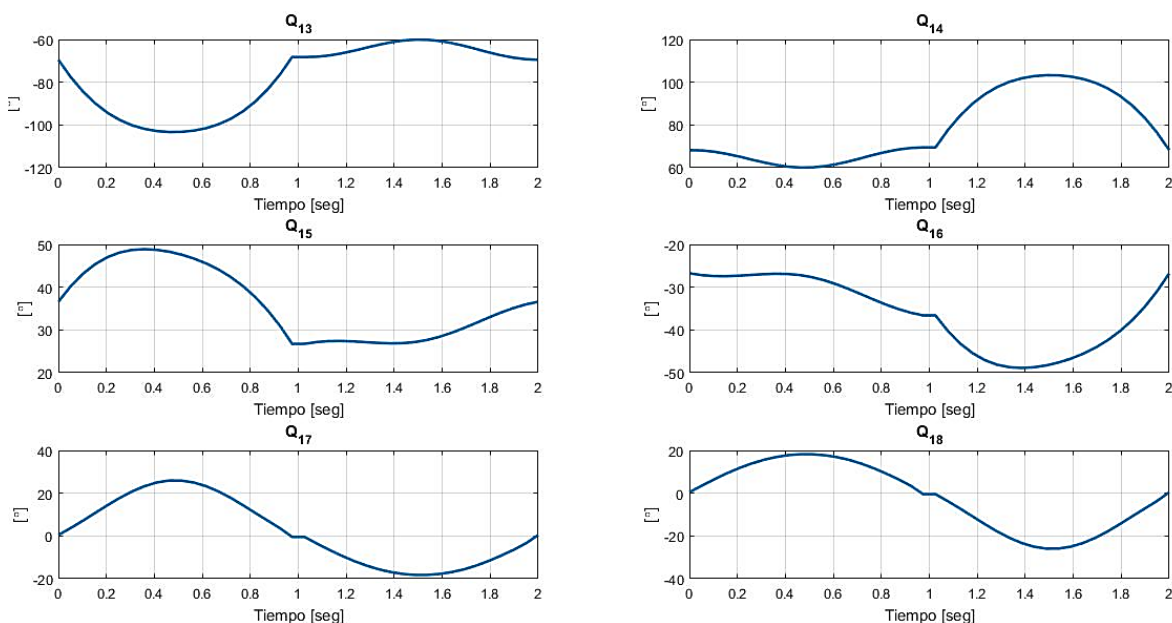


Figura 40. Trayectorias Articulares de la marcha obtenidas mediante optimización. Q_{13} y Q_{14} corresponden a la flexión-extensión de la rodilla, Q_{15} y Q_{16} corresponden a la dorsiflexión del pie, Q_{17} y Q_{18} corresponden al giro vertical (guiñada) de los pies.

Con la terminación de este capítulo, se obtiene el segundo generador de patrones de marcha para el robot bípedo Bioid, basado en el enfoque de minimización mecánica propuesto por Christine Chevalereau. En el siguiente capítulo se realizan las pruebas de marcha y la captura de datos de consumo de energía eléctrica para los dos generadores propuestos.



Capítulo V: Comparación del Consumo de Energía Eléctrica para las Dos Técnicas de Marcha Implementadas

Este capítulo contiene la parte final del proyecto, la cual consiste en la comparación, en términos de consumo de energía eléctrica, de las dos técnicas de marcha bípeda implementadas en la presente investigación. En primera instancia se presenta todo lo relacionado con la experimentación, esto tiene que ver con las pruebas de marcha realizadas, es decir su duración, la cantidad de pruebas, las velocidades de marcha, la toma de datos, el procesamiento de los datos y otras características durante la experimentación. En la segunda parte del capítulo se realiza un análisis estadístico tanto a los datos de energía eléctrica como a los de potencia eléctrica, consumidas por el robot en pruebas de marcha a diferente velocidad.

Finalmente se aplica la prueba no paramétrica de rangos de Wilcoxon para comparar las dos técnicas implementadas, y así determinar si la diferencia entre estas es debida al azar o no estadísticamente significativa.

V.1. Características de la Experimentación

El procedimiento para la realización de pruebas y captura de información se llevó a cabo de la siguiente manera; primero se eligieron tres velocidades de marcha que correspondieron a 0.5 m/min, 1.0 m/min y 1.3 m/min. Esto se decide luego de notar que a velocidades mayores a 1.3 m/min el robot fácilmente pierde el equilibrio y cae, además se debe tener en cuenta que el robot no opera en lazo cerrado y que este trabajo considera la generación de trayectorias pre-calculadas y no el control en línea.

En segundo lugar, se opta por realizar treinta pruebas de marcha por cada una de las dos técnicas implementadas, de las cuales diez se hacen a una velocidad baja, diez más a velocidad intermedia y las diez restantes a una velocidad mayor. En total se realizan sesenta pruebas, de las cuales treinta pertenecen a la marcha tipo Kajita, y treinta a la marcha tipo Chevallereau.



Velocidades usadas en las pruebas de marcha	
Velocidad baja	0.5 [m/min]
Velocidad intermedia	1.0 [m/min]
Velocidad alta	1.3 [m/min]

Tabla 4. Velocidades establecidas para las pruebas de marcha.

Para realizar cada prueba es necesario cargar la batería del robot previamente para obtener datos homogéneos, también se debe resaltar que cada prueba en la que el robot pierde equilibrio y cae no es tomada en cuenta. Por otra parte, todos los experimentos de caminata se realizaron sobre una superficie lisa y sin obstáculos.

En tercer lugar, se encuentra el procedimiento usado para la ejecución de las pruebas. Durante cada experimento, el paso inicial consiste en establecer la conexión Bluetooth del robot con la computadora, enseguida se encienden los motores del robot, después se ordena al robot adquirir la posición de genuflexión, a continuación, se da inicio a la marcha, luego de esto si la caminata y la captura de datos es apropiada se ordena al robot detenerse cuando ha recorrido aproximadamente 0.7 metros, luego de esto se guardan los datos y se desconecta la aplicación en Matlab. En seguida los datos son procesados por un algoritmo adicional que ejecuta el análisis estadístico exclusivamente para el periodo de marcha, eliminando información previa que no sirve para este análisis. Cabe resaltar que cada prueba tarda aproximadamente 10 minutos si todo sale correctamente. La siguiente imagen muestra un ejercicio de captura de datos completa.

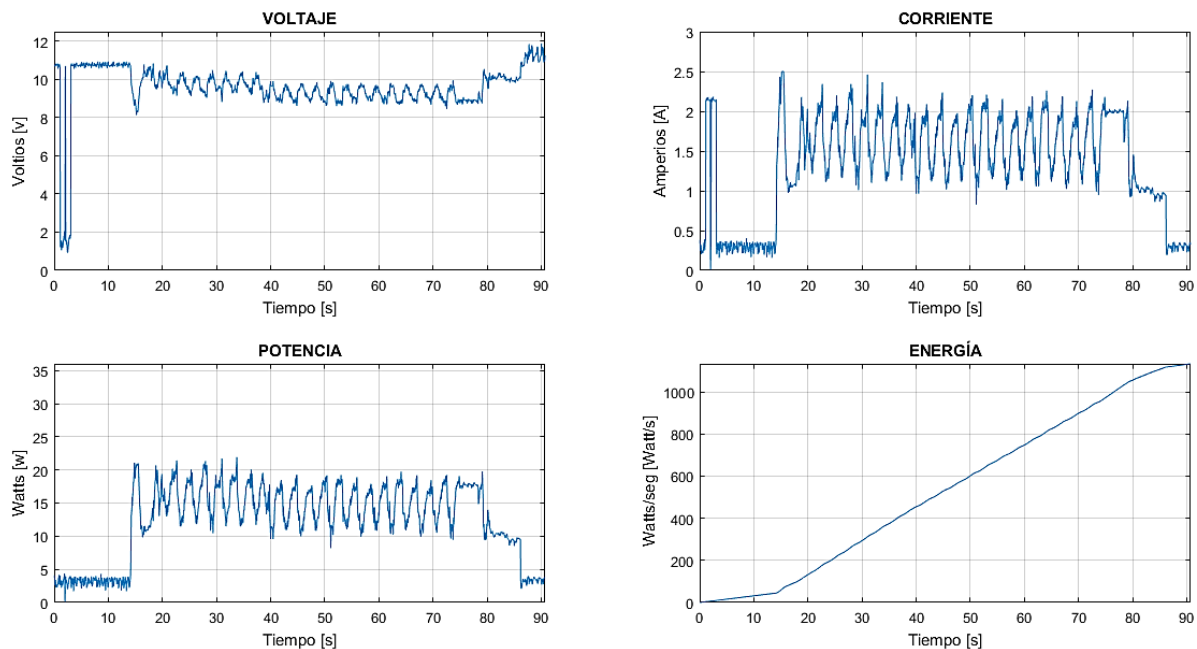


Figura 41. Captura de datos completa para una prueba de 90 segundos con la técnica Cart Table a velocidad 0.5 m/min.

Por ejemplo, en la imagen anterior el procesamiento estadístico se aplica solamente entre al periodo comprendido entre 18s y 76s, esto se debe a que durante ese periodo se ejecutan los movimientos de marcha, para el resto de la prueba los datos pertenecen a preparativos o movimientos preliminares a la caminata, los cuales no son de interés en la medición de energía.

V.2. Análisis de Distribución de Datos de Potencia Eléctrica y Energía Eléctrica

En esta parte del documento se muestran los resultados estadísticos obtenidos. Por tanto, se lleva a cabo la verificación de los datos obtenidos para las 60 pruebas caminata, el lector debe considerar que cada prueba posee alrededor de 2000 a 3000 datos, en este caso se recurre al uso de la herramienta de diagramación de cajas o también conocido como diagrama de caja y bigotes. Esta herramienta consiste en un gráfico dividido en cuartiles que permite observar la distribución de un grupo de datos e identificar datos atípicos o también llamados outliers de las pruebas realizadas, puesto que este tipo de elementos no deseados afectan la representatividad de estadísticas muestrales comúnmente usadas tal



como la media. Estos diagramas de caja son aplicados tanto a los vectores de datos de potencia capturados como a los vectores de datos de energía capturados. El total de los apareamientos estadísticos es mostrado en la siguiente tabla.

Técnica de generación de marcha	Cantidad de pruebas de marcha	Cantidad de pruebas por velocidad	Variable física a analizar en cada prueba	Cantidad diagramas de caja por variable
Kajita	30	10 a velocidad 0.5 m/min	Potencia	10
			Energía	1
		10 a velocidad 1.0 m/min	Potencia	10
			Energía	1
		10 a velocidad 1.3 m/min	Potencia	10
			Energía	1
Chevallereau	30	10 a velocidad 0.5 m/min	Potencia	10
			Energía	1
		10 a velocidad 1.0 m/min	Potencia	10
			Energía	1
		10 a velocidad 1.3 m/min	Potencia	10
			Energía	1

Tabla 5. Totalidad de datos adquiridos en la experimentación de este proyecto.

Para la construcción de los diagramas de caja en el caso de este trabajo se efectúa el siguiente procedimiento:

1. Se ordenan los datos para cada prueba de menor a mayor.

$$E(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

2. Se encuentra la mediana del conjunto de datos previo, de acuerdo con;

$$Md = \begin{cases} \frac{X_{\frac{n+1}{2}}}{2}, & \text{si } n \text{ impar} \\ \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n+1}{2}}}{2}, & \text{si } n \text{ par} \end{cases}$$

3. Se calculan los cuartiles Q_1 y Q_3 , puesto que la mediana corresponde al segundo cuartil.

$$Q_1 = \frac{X_{n+1}}{4}, \text{ corresponde al 25\% de los datos.}$$

Solo si Q_1 es un numero con parte decimal de la forma $Q_1 = a, d$ donde a es entero y d es decimal, entonces el cuartil se calcula como;



$$Q_1 = X_a + d(X_{a+1} - X_a)$$

Para el caso del tercer cuartil se tiene:

$$Q_3 = X_{\frac{3(n+1)}{4}}$$

Q_3 corresponde al 75% de los datos. Solo si Q_3 es un número con parte decimal de la forma $Q_3 = a, d$ donde a es entero y d es decimal, entonces el cuartil se calcula como;

$$Q_3 = X_a + d(X_{a+1} - X_a)$$

4. Luego se determina el rango intercuartílico RIC como;

$$RIC = Q_3 - Q_1$$

5. Las de líneas de extremos o bigotes corresponden a los valores máximo y mínimo de los datos o hasta 1,5 veces el RIC. Es de tener en cuenta que los valores atípicos son aquellos que están ubicados más allá de los bigotes del diagrama.

A partir del procedimiento anterior se construyen los diagramas de caja correspondientes a los datos de potencia de cada prueba realizada, tal como el mostrado en la figura 42, en total son 30 diagramas, de los cuales cada ventana muestra agrupaciones de diez diagramas de caja correspondientes a una técnica de marcha y una velocidad preestablecida.

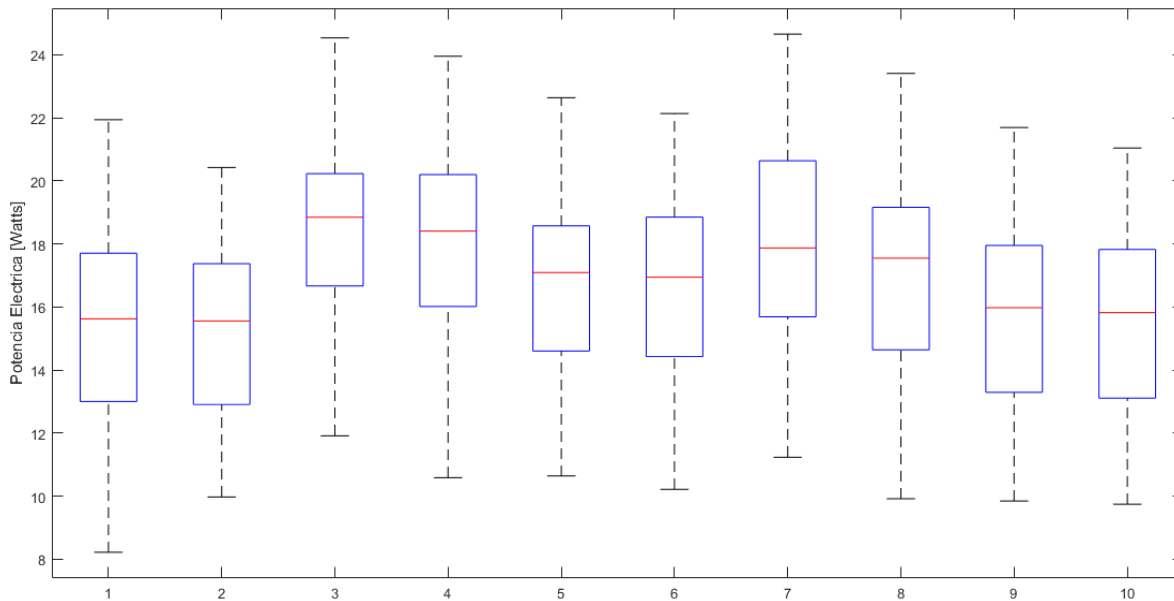


Figura 42. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 0.5 m/min.

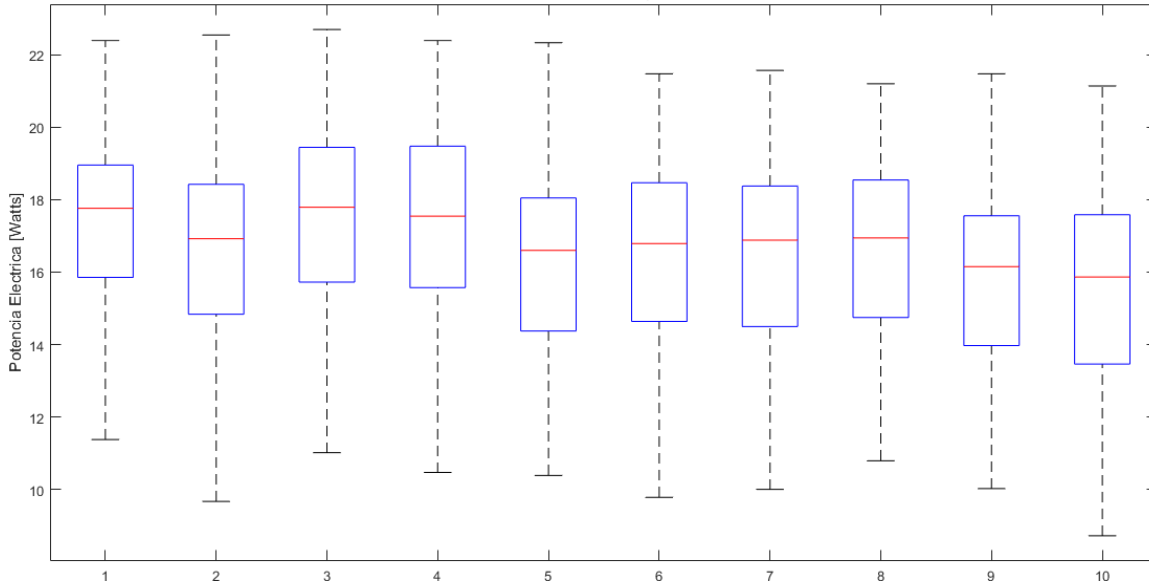


Figura 43. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 1.0 m/min.

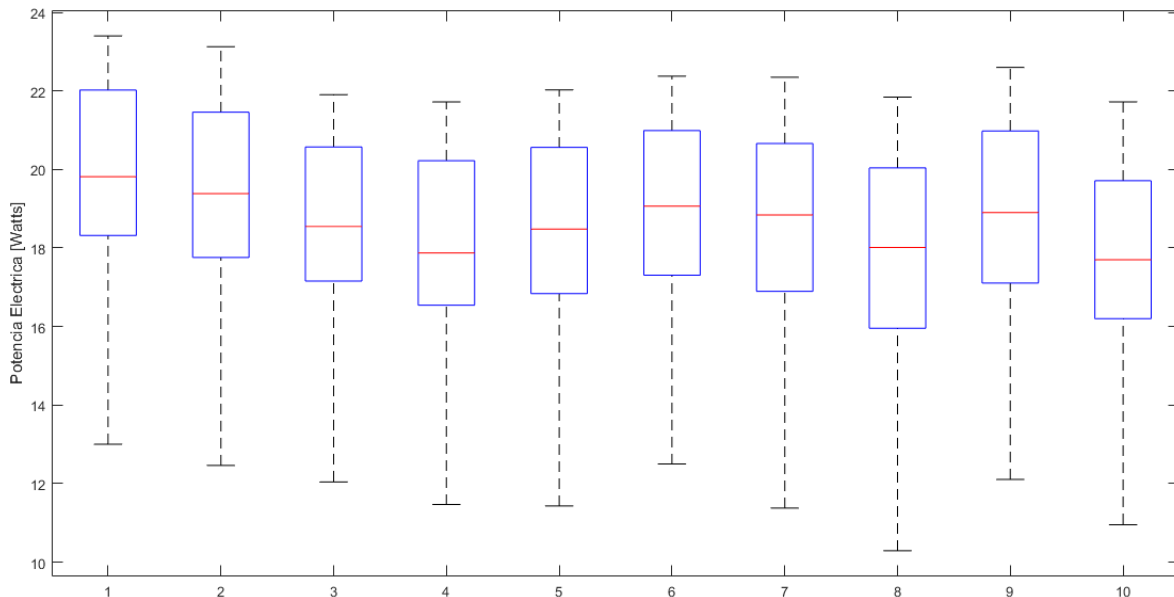


Figura 44. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Kajita con velocidad de 1.3 m/min.

A continuación, se muestran los diagramas de caja para los vectores de datos de potencia en las pruebas obtenidas a partir de las trayectorias de marcha tipo Chevallereau.

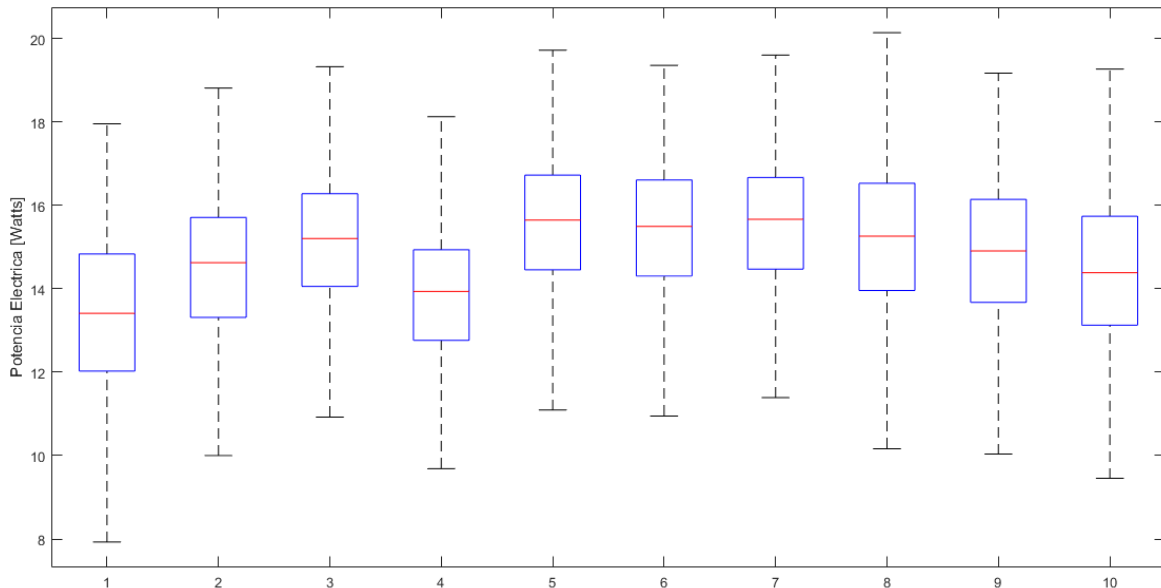


Figura 45. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 0.5 m/min.

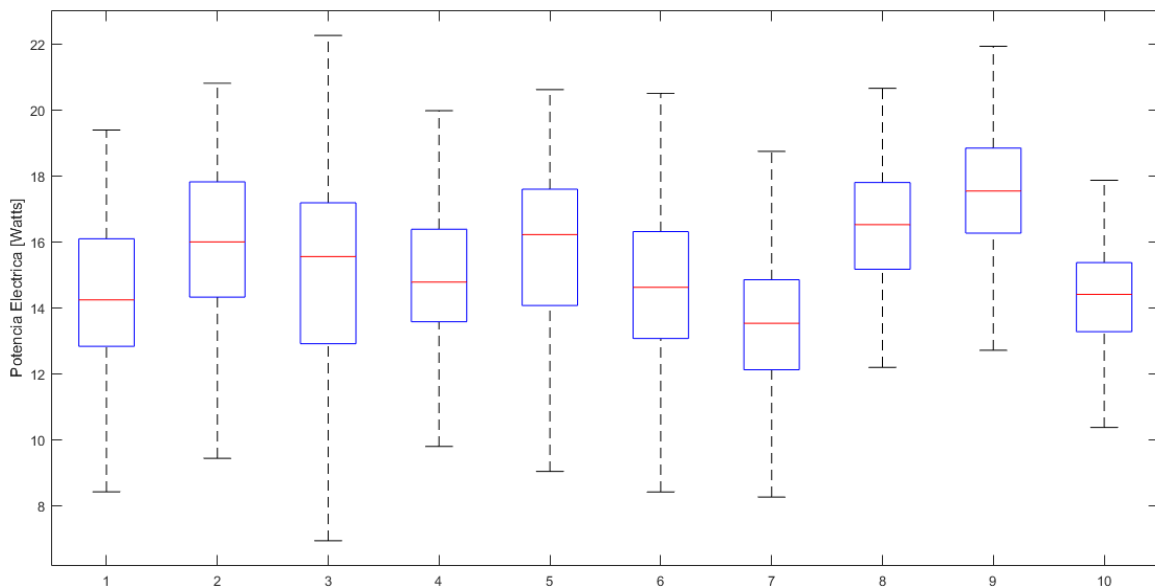


Figura 46. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 1.0 m/min.

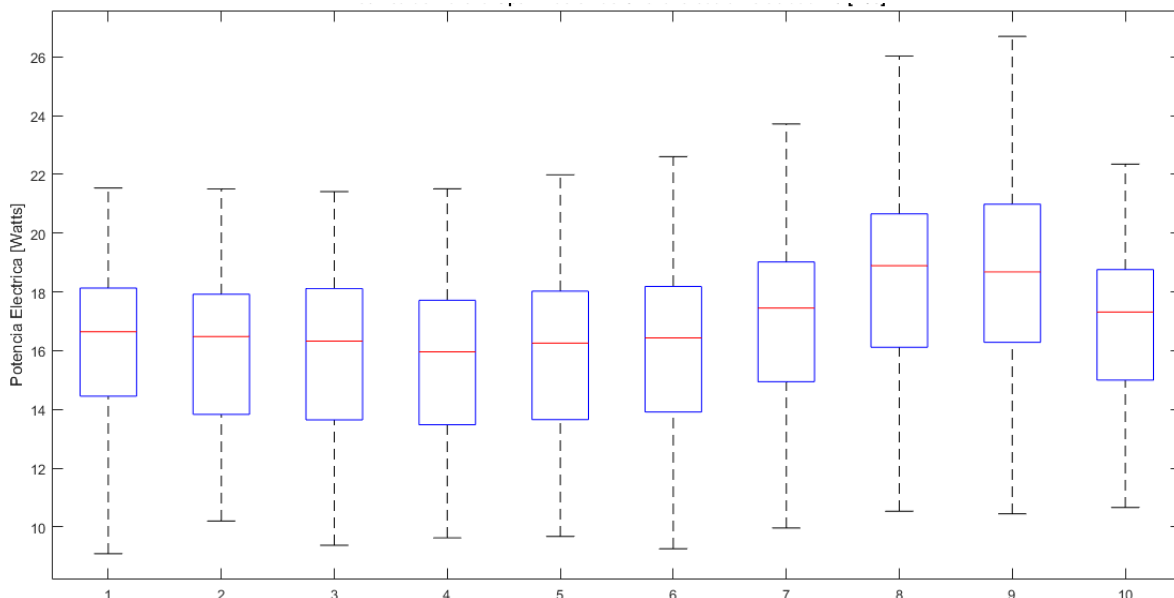


Figura 47. Diagramas de distribución por cuartiles de la potencia eléctrica instantánea consumida por el robot en cada una de las 10 trayectorias de marcha tipo Chevallereau con velocidad 1.3 m/min.

Mediante inspección visual de las gráficas de distribución de potencia eléctrica mostradas anteriormente, es posible evidenciar que, en todas las pruebas de marcha para una misma velocidad, la mediana con menor valor corresponde siempre al grupo de pruebas realizadas con la técnica de marcha tipo Chevallereau. Una explicación de este fenómeno podría deberse a que las trayectorias de posición articular descritas por la técnica Chevallereau son bastante suaves, en comparación con la técnica tipo Kajita. Es decir, estas últimas presentan cambios instantáneos de posición articular en los motores, lo cual obliga a que los controladores individuales generen esfuerzos de control grandes sobre los motores de robot, incidiendo en el aumento de la potencia eléctrica gastada.

A continuación, para cada una de las 60 pruebas de marcha y tomando como insumo los vectores de datos de potencia eléctrica se calcula el valor escalar de energía eléctrica, para cada prueba de marcha, es decir la energía eléctrica total resultado de la integral de la potencia eléctrica durante el periodo comprendido de la caminata. Tras cada prueba de marcha es obtenida la energía eléctrica aplicando integración numérica a las señales de potencia eléctrica tal como se explicó en la sección II.4. Lo anterior genera un escalar por cada prueba de marcha y permite crear un nuevo grupo de 10 datos por cada técnica de

marcha junto a una velocidad establecida. En total se obtienen seis nuevos vectores de datos de energía eléctrica a los cuales también le es aplicado el análisis de distribución de datos bajo diagramas de caja. En seguida se muestran los resultados.

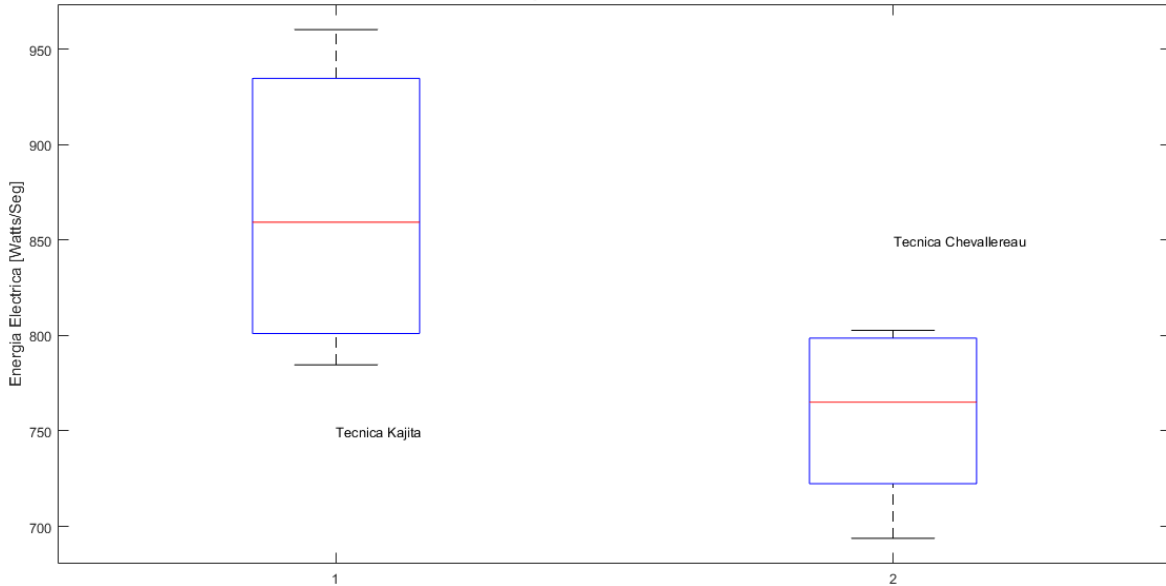


Figura 48. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 0.5m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.

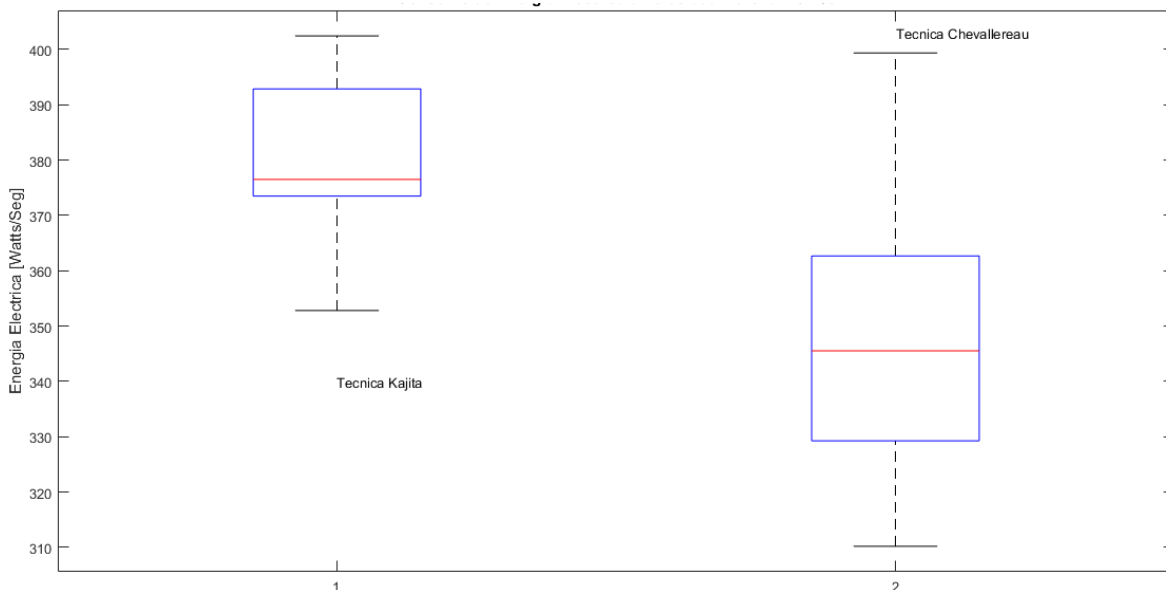


Figura 49. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 1.0m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.

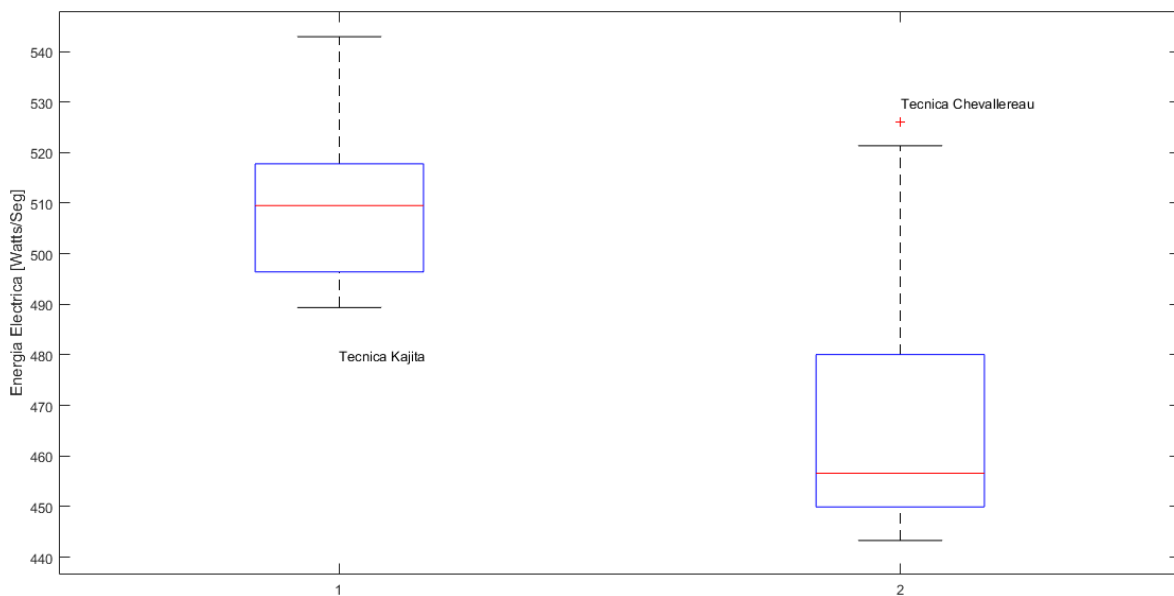


Figura 50. Diagramas de distribución por cuartiles de la energía eléctrica consumida por el robot a velocidad 1.3m/min para las técnicas de marcha tipo Kajita y tipo Chevallereau respectivamente.

De los gráficos anteriores se puede inferir que la adquisición de datos tanto de potencia eléctrica como de energía eléctrica probablemente posee una distribución irregular, lo cual es decisivo a la hora de aplicar pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, sin embargo, esto se verificará más adelante, con la prueba Jarque-Bera. Igualmente es notorio que el consumo de energía eléctrica para las tres velocidades de marcha usadas en esta investigación, muestran mediante análisis visual que la técnica de generación de caminata tipo Chevallereau, posee en los tres casos de diferente velocidad, un valor de la mediana menor comparado con el de la técnica tipo Kajita. Este mismo fenómeno sucede tanto para los límites inferiores y superiores de todos los bigotes de los diagramas de caja.

V.3. Prueba Estadística No Paramétrica de Wilcoxon

La estadística no paramétrica es un segmento de la estadística recomendable cuando no se puede asumir que los datos experimentales de una prueba se ajustan a una distribución conocida, además cuando estos no cumplen con condiciones de validez y además cuando las muestras son pequeñas. Se puede decir que las pruebas no paramétricas son más robustas que las pruebas paramétricas, en otras palabras, son válidas en un rango mayor de situaciones puesto que exigen menos condiciones de validez para los datos. Sin embargo,



estadísticamente su potencia para conducir al rechazo o afirmación de una hipótesis no es tan alta como el de una prueba paramétrica, inclusive si se ejecutase sobre los mismos datos.

En esta parte del capítulo final se realiza un análisis de la relación entre una variable cuantitativa y otra cualitativa.

- ✓ Variable cuantitativa: consumo de energía eléctrica durante la marcha.
- ✓ Variable cualitativa: técnica de marcha implementada (Técnica Kajita, Técnica Chevallereau).

Lo que se pretende es estudiar si el consumo de energía eléctrica durante la marcha del robot bípedo Bioloid depende de una u otra técnica de marcha implementada.

En este caso si el consumo de energía eléctrica medido durante las pruebas de marcha a diferentes velocidades es equivalente, tanto para la técnica basada en el modelo simplificado Cart Table y la técnica basada en minimización de la energía mecánica, se podría afirmar que el consumo de energía eléctrica no depende del tipo de técnica implementada, estadísticamente esto sería un contraste de tendencia central.

De acuerdo con la figura 51, estadísticamente se trabaja diferente si los datos poseen distribución normal o no normal, pero también teniendo en cuenta que para el segundo caso puede tratarse de muestras pequeñas. Para el primer caso la hipótesis nula sería que los datos tienen la misma media, es decir se contrasta igualdad de tendencia central en media contra una de las tres posibles alternativas $H_a = \{\mu_1 \neq \mu_2, \mu_1 > \mu_2, \mu_1 < \mu_2\}$. Para el caso contrario los datos son no normales y se observa que, en el gráfico de caja, la mediana está más cercana a uno de los extremos de la caja, además de que los bigotes son de diferente tamaño. En este caso la hipótesis a contrastar radica en que la mediana de un grupo de datos es igual a la mediana del otro con respecto a las hipótesis alternativas $H_a = \{M_{e1} \neq M_{e2}, M_{e1} > M_{e2}, M_{e1} < M_{e2}\}$.

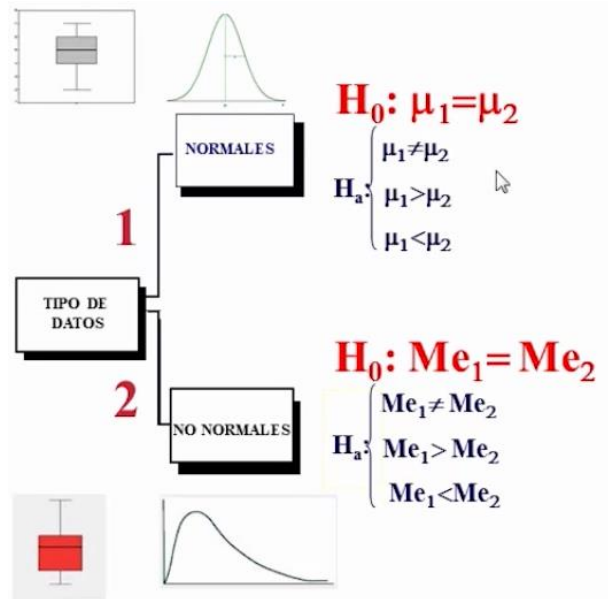


Figura 51. Tratamiento estadístico de datos según su distribución. Imagen tomada de video clases online Universidad de Salamanca [88].

La inspección visual de los diagramas de caja y bigotes del ítem V.2, aparentemente muestran que existe una distribución no normal de los datos, sin embargo, esto puede deberse a que los datos de energía son pocos, en este proyecto se plantea aplicar la prueba Jarque-Bera para certificar la naturaleza de los datos. Esta es una prueba estadística de verificación de ajuste para comprobar si un grupo de datos tiene la asimetría y la curtosis de una distribución normal, es decir alguno de los comportamientos de distribución de datos de la figura 52.

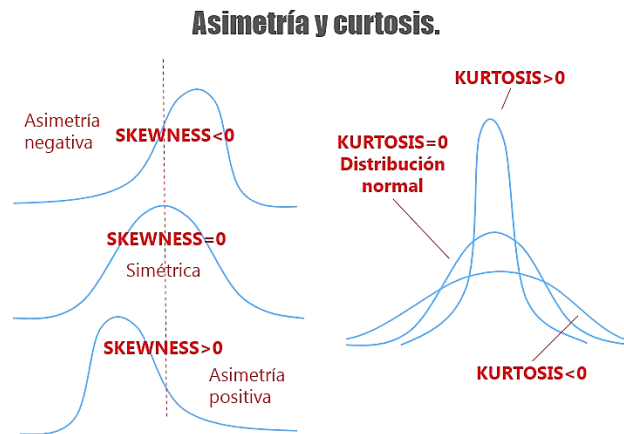


Figura 52. Evidencia empírica de la prueba Jarque-Bera basada en asimetría y curtosis. Imagen tomada de material de resumen clases de estadística.



Esta prueba es crucial, puesto que tras su resultado se establece el tipo de tratamiento o camino a seguir de acuerdo con la figura 51, es decir conocer la naturaleza de los datos de esta investigación para aplicar la herramienta estadística apropiada en el próximo paso de este proceso.

Bajo la hipótesis nula H_0 de que los datos de potencia y energía están distribuidos normalmente, se plantea formalmente el supuesto de normalidad siguiente:

$$H_0: E \sim N, \text{ datos de energía poseen distribución normal, con media y varianza desconocidas}$$

En esta prueba se usa el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, y el estadístico de la prueba se aplica mediante el comando en Matlab $[h,p] = \text{jbtest}(X)$. El tamaño de la muestra, es decir de los datos de energía es $n=10$.

Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
	Resultados	Cart Table de Kajita
Velocidad de marcha: 0.5 [m/min]		
Variable de análisis: distribución de datos		
P-valor (significancia de la prueba estadística)		0.2922
h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	0	0
Hipótesis nula H_0	<i>datos de energía poseen distribución normal, con media y varianza desconocidas</i>	
Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto	

Tabla 6. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 0.5m/min.

Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
	Resultados	Cart Table de Kajita
Velocidad de marcha: 1.0 [m/min]		
Variable de análisis: distribución de datos		



P-valor (significancia de la prueba estadística)	0.8740	0.7600
h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	0	0
Hipótesis nula Ho	<i>datos de energía poseen distribución normal, con media y varianza desconocidas</i>	
Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto	

Tabla 7. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 1.0m/min.

Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
	Resultados	Cart Table de Kajita
Velocidad de marcha: 1.3 [m/min]		
Variable de análisis: distribución de datos		
P-valor (significancia de la prueba estadística)		0.5761
h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	0	0
Hipótesis nula Ho	<i>datos de energía poseen distribución normal, con media y varianza desconocidas</i>	
Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto	

Tabla 8. Resultado de aplicación de la prueba de Jarque-Bera para la muestra de energía a velocidad 1.3m/min.

En los tres casos anteriores el h-valor de prueba Jarque-Bera es igual a cero, esto significa que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y que los datos se podrían considerar provenientes de una distribución normal.

El lector debe considerar que el tamaño de la muestra, en este caso la energía, es muy pequeña, y por tanto cuando se trabaja con muestras pequeñas $n \leq 10$, en las que no es viable la veracidad de la hipótesis de normalidad de los datos, y además cuando existen datos atípicos, la prueba de normalidad pierde poder estadístico, y entonces conviene utilizar pruebas robustas y de hecho corroborar los resultados obtenidos a partir de la



utilización de pruebas basadas en la normal. En el caso de estudio de este proyecto se considera el uso de pruebas robustas y por tanto se confirma la pertinencia de aplicar la prueba de rangos de Wilcoxon.

Es importante saber que al disponer se puede disponer de datos independientes y datos dependientes, en el primer caso es aconsejable usar la prueba U de Mann Whitney y para el segundo caso la prueba de rangos de Wilcoxon, lo anterior se muestra en el siguiente gráfico.

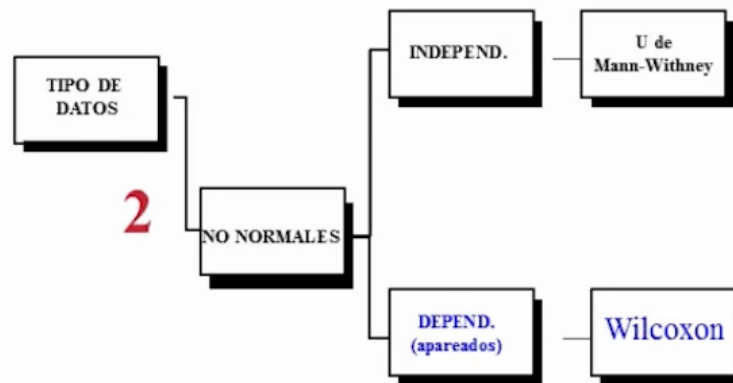


Figura 53. Sub clasificación de datos con distribución no normal [88].

La prueba no paramétrica de Wilcoxon se caracteriza por comparar medianas, además trabaja sobre rangos de orden, es menos potente que la prueba clásica T de Student, sin embargo, su potencia radica en poder rechazar la hipótesis nula H_0 cuando realmente es falsa.

En el caso de este proyecto la hipótesis nula asociada a la investigación es la siguiente:

H_0 : “*el consumo de energía eléctrica durante la marcha del robot bípedo Bioloid no depende del tipo de técnica de marcha implementada*”

También se podría afirmar que la H_0 es equivalente a estudiar la hipótesis alternativa H_a ; es decir, si las diferencias entre el consumo de energía de las dos técnicas de marcha se pueden considerar nulas o no. Sin embargo, se quiere discriminar cuál de las técnicas marcha tiene un mayor consumo energía, por lo cual se plantea un contraste unilateral, implicando que la mediana de un grupo de datos es mayor o menor que la mediana del otro.

H_a : “*El consumo de energía obtenido con el método Cart Table es mayor al obtenido mediante optimización*”

$$H_0: \text{Mediana}_{\text{diferencias}} = 0$$



Ha: Mediana $Me_1 > Me_2$

Una vez establecida la hipótesis a verificar se procede a realizar el procedimiento de aplicación de la prueba no paramétrica de Wilcoxon, esta se puede resumir de la siguiente forma:

- ✓ Calcular las diferencias entre cada par de datos de la muestra tomada en un mismo instante de tiempo. Si existen resultados nulos de las diferencias estos se deben eliminar, puesto que no aportan nada al análisis.
- ✓ Ordenar las diferencias de forma ascendente independientemente de los signos.
- ✓ Asignar un rango de orden a las diferencias
- ✓ Se corrigen problemas de ligaduras, es quiere decir que para diferencias repetidas se asigna un rango de orden medio.
- ✓ Se realiza la suma de rangos teniendo en cuenta los signos de las diferencias, bien sea para $T(+)$ o para $T(-)$.

$T(+)$: correspondiente a la suma de rangos con diferencias positivas.

$T(-)$: correspondiente a la suma de rangos con diferencias negativas.

- ✓ Enseguida se calcula el estadígrafo de contraste T :

$$T = \min(T(+), T(-))$$

- ✓ Luego se acude a la tabla para prueba de suma de rangos de Wilcoxon y se observa si para la cantidad de datos usados el estadígrafo se encuentra dentro de los intervalos propuestos por la tabla. Esto indica que si T pertenece al intervalo se acepta la hipótesis H_0 , puesto que el p -valor > 0.05 de significancia muestra que el riesgo de rechazar la hipótesis nula es demasiado alto, si por el contrario T no pertenece al intervalo se rechaza la hipótesis nula H_0 además mostrando que el p -valor < 0.05 con bajo riesgo de rechazo. Por ejemplo; si T pertenece al intervalo de un número n de datos, se podría concluir que el consumo de energía eléctrica no depende del tipo de marcha implementada.

Para el caso de este proyecto no se han utilizado tablas de aproximación, dado que en su lugar la prueba de rangos de Wilcoxon se realizó mediante el comando `ranksum()` predeterminado en Matlab, lo cual permite hallar un p -valor exacto de significancia en las pruebas de marcha.



El comando ranksum(A , B) entrega el p-valor de la suma de rangos de Wilcoxon, con el cual se prueba la hipótesis nula H_0 de que los vectores de datos A y B son muestras de distribuciones continuas con medianas iguales versus la alternativa de que no lo son.

A partir de las muestras (vectores de datos de energía) obtenidas en la sección V.2., tanto para la marcha basada en optimización como para la marcha basada en el modelo simplificado Cart Table, y estas a su vez a tres velocidades diferentes se aplica la prueba de rangos de Wilcoxon en Matlab, esto se resume en las siguientes tablas.

Resultados	Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
		Cart Table de Kajita	Optimización de Chevallereau
		Velocidad de marcha: 0.5 [m/min]	
		Variable de análisis: consumo de energía eléctrica [W/s]	
	P-valor (significancia de la prueba estadística)	5.2502e-04	
	h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	1	
	Hipótesis nula H_0	<i>El consumo de energía eléctrica durante la marcha del robot bípedo Bioloid no depende del tipo de técnica de marcha implementada</i>	
	Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto	

Tabla 9. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 0.5m/min.

Resultados	Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
		Cart Table de Kajita	Optimización de Chevallereau
		Velocidad de marcha: 1.0 [m/min]	
		Variable de análisis: consumo de energía eléctrica [W/s]	
	P-valor (significancia de la prueba estadística)	0.008930697785187	



h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	1
Hipótesis nula Ho	<i>El consumo de energía eléctrica durante la marcha del robot bípedo Bioloid no depende del tipo de técnica de marcha implementada</i>
Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto

Tabla 10. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 1.0m/min.

Descripción	Técnicas de generación de Marcha	
	Resultados	Cart Table de Kajita
Velocidad de marcha: 1.3 [m/min]		
Variable de análisis: consumo de energía eléctrica [W/s]		
P-valor (significancia de la prueba estadística)		
	0.008930697785187	
h-valor (valor lógico resultado de la prueba)	1	
Hipótesis nula Ho	<i>El consumo de energía eléctrica durante la marcha del robot bípedo Bioloid no depende del tipo de técnica de marcha implementada</i>	
Resultado	h=1 indica rechazo de la hipótesis nula con alto nivel de acierto	

Tabla 11. Resultado de aplicación prueba de rangos Wilcoxon a velocidad 1.3m/min.

De las tablas 9, 10 y 11, la prueba estadística Wilcoxon indica el rechazo de la hipótesis nula Ho, por tanto, el experimento muestra que el consumo de energía eléctrica si depende de la técnica de marcha implementada en el controlador del robot. Mientras que la hipótesis alternativa Ha de contraste unilateral, confirma que el consumo de energía eléctrica del robot Bioloid es mayor cuando la marcha ha sido generada mediante el modelo Cart Table de Kajita, en comparación con la técnica de minimización mecánica propuesta por Chevallereau.



El script de Matlab usado es el siguiente:

```

%% PRUEBA DE WILCOXON:
% Vectores de datos de consumo de energia electrica para
% las pruebas de marcha tipo Kajita y Chevallereau, ambos
% a velocidad a 0.5m/s

A = V_energiaCT05;
B = V_energiaOP05;

[p,h] = ranksum(A,B,'method','exact','tail','right');
if(h== 1)
    disp("h=1 indica un rechazo de la hipotesis nula");
end
if(h == 0)
    disp("h=0indiqca que no se rechaza la hipotesis nula")
end
    
```

Figura 544. Script de Matlab para realizar la prueba de rangos Wilcoxon.

La primera opción de argumento en el comando ranksum de Matlab ‘method’, ‘exact’, permite el cálculo del p-valor de forma exacta, mientras que la segunda opción ‘tail’, ‘right’, prueba la hipótesis alternativa en donde la mediana de la muestra A es mayor que la mediana de la muestra B.

Finalmente, para este capítulo se anexa la tabla comparativa de acuerdo a tres características observadas a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Característica	Consumo de energía eléctrica E	Tiempo de computo	Dificultad de síntesis	COT $COT = \frac{E}{mgd}$
Generador de marcha				
Optimización de energía mecánica (Chevallereau)	Menor	Mayor	Mayor	Menor
Modelo Cart Table (Kajita)	Mayor	Menor	Menor	Mayor

Tabla 12. Comparación de las técnicas de generación de marcha usadas en este proyecto.

La comparación adicional muestra que los modelos de dinámica simplificada logran que el proceso de generación de trayectorias, cálculo matemático y uso de recursos de



procesamiento sean menores, en cierto modo esto disminuye el tiempo de puesta en marcha para un robot bípedo. De otra parte, la técnica de minimización con dinámica completa, expone todo lo contrario en relación a estas características, a pesar a esto, verdaderamente contribuye al aumento del tiempo de autonomía de un robot bípedo, y por tanto merece el esfuerzo de su aplicación.



Capítulo VI: Observaciones

- ✓ Cuando se desea conocer el consumo de energía eléctrica de un sistema robótico cuya única fuente de poder alimenta al mismo sistema de medición y monitoreo, es evidente que los cambios drásticos de voltaje y corriente tras la activación de los motores, descompensan el sistema de medición, por tal motivo es indispensable contrarrestar este fenómeno mediante arreglos electrónicos de regulación, disminución de rizado y sobre todo solventar la afectación del referencial de voltaje usado para el muestreo de señales mediante el ADC.
- ✓ El sensor de corriente diseñado se ajusta a las necesidades básicas del proyecto (rangos de operación, precisión y economía) sin embargo un sensor de corriente basado en una carga resistiva tipo Shunt es propenso a errores de medición debido a cambios de temperatura y altas de frecuencias de la señal medida, esto se evidenció tras capturar datos de corriente durante pruebas de marcha a velocidades mayores a 1.5m/min, llevando a un aumento de temperatura en la resistencia shunt y al mismo tiempo modificando el valor resistivo e incidiendo en la medición. Por tanto, es posible su mejora futura mediante uso de técnicas como; transformación de corriente, bobina de Rogowski o sensor de estado sólido de efecto hall.
- ✓ El algoritmo de cálculo para la generación de marcha mediante las dos técnicas usadas en este proyecto (modelo Cart Table y optimización de energía mecánica) es de alta complejidad, por lo cual es imposible generar trayectorias online sobre robots de tipo académico, los cuales están basados en micro controlador y no tienen la capacidad suficiente para resolver estos algoritmos de síntesis, como es caso del procesador CM530 de Bioloid Premium Kit.
- ✓ La forma de onda de las trayectorias de marcha basadas en optimización tiene grandes similitudes a los Generadores Centrales de Patrones en régimen permanente, es decir cuando estos últimos se comportan como osciladores sinusoidales de frecuencia fija. Esto es interesante y lleva a reflexionar sobre el siguiente enunciado; es necesario continuar con la exploración de la optimización sabiendo que su dificultad de cálculo debida a la dinámica inversa es mucho mayor, comparada con técnicas como ondas



sinusoidales acopladas o el mismo generador trayectorias basado en el modelo Cart Table, sí los resultados de caminata son marcha son similares.

- ✓ Los métodos de generación de patrones usados permiten marcha omnidireccional sin embargo aquí solo se trabajó en sentido de avance, por lo que sería interesante probar los giros durante la marcha y observar la influencia en el consumo de energía para las dos técnicas de marcha estudiadas. Es decir, observar cuál de las dos técnicas consume mayor energía cuando el robot gira.
- ✓ La técnica de generación de marcha a partir de minimización de la energía mecánica, inclusive podría entregar mejores resultados al considerar la minimización de las pérdidas de energía térmica, no solo por efecto Joule, es decir, incluir también un índice de desempeño que represente el calor debido a la fricción interna de los componentes del motor.
- ✓ Sería interesante plantear un algoritmo online de control óptimo para gestión de equilibrio y seguimiento de trayectorias de referencia basadas en la técnica de minimización de energía. De esta forma se podría evaluar, en conjunto un algoritmo de generación de patrones y un algoritmo de control de marcha, ambos basados en optimización de energía.



Capítulo VII: Conclusiones

- ✓ Teniendo en cuenta el análisis estadístico no paramétrico bajo la prueba de rangos de Wilcoxon del capítulo V sección V.3, se puede afirmar que la diferencia en el consumo de energía eléctrica para las dos técnicas de marcha estudiadas no se debe al azar y por el contrario el consumo de energía eléctrica en robots bípedos si depende de la técnica de marcha implementada para la generación de trayectorias de referencia.
- ✓ De igual forma, se puede afirmar que la técnica de marcha basada en minimización de la energía mecánica propuesta por Chevallereau conlleva a un ahorro de energía eléctrica en comparación con la técnica Cart Table de Kajita.
- ✓ La técnica de marcha basada en optimización evidentemente muestra mejores resultados si la variable de comparación es energía, sin embargo, en cuanto a obtención de modelos y cálculo de síntesis, es demasiado complejo, además su tiempo de computo es alto comparado con la técnica de marcha basada en el modelo Cart Table.
- ✓ En general las curvas de referencia que describe la técnica de marcha tipo Kajita, en ocasiones incluye variaciones bruscas de posición articular entre un instante de tiempo y otro. Lo cual aumenta el esfuerzo de control sobre los motores y exige mayor potencia eléctrica de alimentación.
- ✓ Se planeó la rotación Φ de los pies respecto al eje X constante e igual a cero, de esta manera se aseguró que la planta del pie se mantenga paralela al suelo, al menos esto se cumplió durante la simulación. Lo cual en la práctica no fue exactamente como se planeó puesto que las articulaciones motorizadas poseen componentes no lineales como juego mecánico, algunas piezas flexibles y otros fenómenos no modelados, que impiden que el contacto del pie con el suelo fuese totalmente plano. Durante estas pruebas el robot se encuentra en lazo abierto, por tanto, es imposible compensar algún tipo de perturbación debido a anomalías no formalizadas como; no linealidades, juego mecánico en motores, flexibilidad de los eslabones plásticos del robot, que a su vez provocan inestabilidades de marcha y que además afectan el consumo de energía.



Bibliografía

- [1] F. Pfeiffer y H. Inoue, «Walking: Technology And Biology,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, n° 1850, pp. 3-9, Noviembre 2006.
- [2] J. J. Tacué González y C. F. Rengifo Rodas, «Acerca del Modelado, Control y Generación de Marcha en Robots Bípedos,» *Revista Ingenium*, vol. 18, n° 35, p. 1, 2017.
- [3] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki y K. Fujimura, «The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration,» de *International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, Lausanne, 2002.
- [4] J. Chestnutt, M. Lau, G. Cheung, J. Kuffner, J. Hodgins y T. Kanade, «Footstep Planning for the Honda ASIMO Humanoid,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Miami Beach, USA, 2005.
- [5] K. Kaneko, . F. Kanehiro, S. Kajita , H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi y T. Isozumi, «Humanoid Robot HRP-2,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, 2004.
- [6] K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Harada, G. Miyamori y K. Akachi , «Humanoid Robot HRP-3,» de *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, 2008.
- [7] K. Kaneko, F. Kanehiro, G. Miyamori, K. Akachi, M. Morisawa, A. Hayashi y N. Kanehira , «Humanoid Robot HRP-4 - Humanoid Robotics Platform With Lightweight and Slim Body,» de *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, 2011.
- [8] Aldebaran Robotics, *User Guide and Technical Guide for Nao Robot*, 2017.
- [9] S. Fernandez Iglesias, «Locomocion Bípeda del Robot Humanoide Nao,» Barcelona, 2009.
- [10] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J.-H. Oh y J. Lee, «Mechanical Design of the Humanoid Robot Platform, HUBO,» *Advanced Robotics*, vol. 21, n° 11, pp. 1305-1322, Abril 2007.
- [11] G. Atmeh, I. Ranatunga, D. Popa, K. Subbarao, F. Lewis y P. Rowe , «Implementation of an Adaptive, Model Free, Learning Controller on the Atlas Robot,» de *American Control Conference (ACC)*, Portland, 2014.
- [12] S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu y C. Atkeson, «Optimization Based Full Body Control for the Atlas Robot,» de *International Conference on Humanoid Robots IEEE-RAS*, Madrid, 2014.
- [13] A. kuo, «Choosing Your Steps Carefully: Trade-Offs Between Economy and Versatility in Dynamic Walking Bipedal Robots,» *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, n° 2, pp. 18-29, junio 2007.
- [14] M. A. Roa, C. Villegas y D. A. Garzon, «Modelamiento, Estabilidad e Implicaciones Biomecánicas de la Caminata Bípeda Pasiva con Tres Grados de Libertad,» *Revista de Ingenieria e Investigacion*, vol. 27, n° 2, pp. 77-84, 2007.
- [15] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake y M. Wisse, «Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers,» *Science*, vol. 307, n° 5712, pp. 1082-1085, 2005.
- [16] J. Lima, j. Goncalvez, P. Costa y P. Moreira, «A Passive System Approach to Increase the Energy Efficiency in walk movements Based in realistic simulationenvironment,» de *9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, Castelo Branco, Portugal, 2009.
- [17] D. Hein y M. Hild, «Simloid. Research on Biped Robots Controller, Using Physical Simulation and Machine Learning Algorithms,» de *Concurrency Specification and Programming*, Wandlitz, Alemania, 2006.
- [18] M. Ogino, «Embodiment Approaches to Humanoid Behavior - Energy efficient walking and



- visuo-motor mapping,» Tesis Doctoral, Osaka, 2005.
- [19] T. Kröger, *On-Line Trajectory Generation in Robotic Systems: Basic Concepts for Instantaneous Reactions to Unforeseen (Sensor) Events*, Primera ed., Springer, Ed., Braunschweig: Springer Tracts in Advanced Robotics, 2010.
- [20] M. Yim, «Locomotion With A Unit-Modular Reconfigurable Robot,» Stanford, USA, 1994.
- [21] F. Rivas, J. Cañas y J. Gonzalez, «Aprendizaje Automático de Modos de Caminar para un Robot Humanoide,» de *Proceedings of the 6th international conference on Human robot interaction*, Lausanne, 2011.
- [22] Z. F. Llansola, «Robots Humanoides,» International UJI Robotics School on Humanoids Robots, Castellon, 2006.
- [23] J. Zhan, R. Xiong y Y. Sun, «A ZMP and CoM Online Replanning Method for Stable Walking of Bipedal Robots,» de *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Guiyang, 2013.
- [24] C.-M. Chew, E. Choong, A.-N. Poo y G.-S. Hong, «From Science Fiction To Reality - Humanoid Robots,» de *First Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control*, Manila, Filipinas, 2003.
- [25] H. Dai, A. Valenzuela y R. Tedrake, «Whole-body Motion Planning with Centroidal Dynamics and Full Kinematics,» de *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Madrid, España, 2014.
- [26] T. Saidouni, «Numerical Synthesis of Three-Dimensional Gait Cycles by Dynamics Optimization,» *Robotica*, vol. 29, n° 3, pp. 445-459, 2010.
- [27] J. Grizzle, C. Chevallereau, R. Sinnet y A. Ames, «Models, Feedback Control, and Open Problems of 3D Bipedal Robotic Walking,» *Automatica*, vol. 50, n° 8, p. 1955–1988, 2014.
- [28] I. Ahmed , I. Aris, A. Juraiza Ishak y M. Hamiruce Marhaban, «Power Consumption Rate Analysis of Bioloid Humanoid Robot: Towards Energy Saving And Source Development,» de *10th Asian Control Conference (ASCC)*, Kota Kinabalu, Malasia, 2015.
- [29] Y. Aoustin, «Walking Gait of a Biped with a Wearable Walking Assist Device,» *International Journal of Humanoid Robotics*, World Scientific Publishing, vol. 12, n° 2, pp. 20-42, 2015.
- [30] W. Schiehlen, «Energy-Optimal Design of Walking Machines,» *Multibody System Dynamics*, vol. 13, n° 1, p. 129–141, 2005.
- [31] C. Chevallereau y Y. Aoustin, «Optimal Reference Trajectories for Walking and Running of a Biped Robot,» *Robotica*, vol. 19, n° 5, pp. 557-569, 2001.
- [32] D. Tlalolini, Y. Aoustin y C. Chevallereau, «Design of a Walking Cyclic Gait with Single Support Phases and Impacts for the Locomotor System of a Thirteen-Link 3D Biped Using the Parametric Optimization,» *Multibody System Dynamics*, Springer Verlag, vol. 23, n° 1, pp. 33-56, 2010.
- [33] S. Ma, «Time Optimal Control of Manipulators with Limit Heat Characteristics of Actuators,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '99.*, Kyongju, Corea, 1999.
- [34] . S. Hyeok-Ki y B. K. Kim, «Energy-Efficient Gait Planning and Control for Biped Robots Utilizing Vertical Body Motion and Allowable ZMP Region,» *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 62, n° 4, pp. 2277-2286, 2015.
- [35] D. Tlalolini, C. Chevallereau y Y. Aoustin, «Human-Like Walking: Optimal Motion of a Bipedal Robot With Toe-Rotation Motion,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, n° 2, pp. 310-320, 2010.



- [36] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi y H. Hirukawa, «Biped Walking Pattern Generation By Using Preview Control Of Zero-Moment Point,» de *Proceedings International Conference on Robotics and Automation ICRA'03*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [37] R. Munk, «Advanced Control of Biped Robot Motion,» Zagreb, 2015.
- [38] L. Contreras Bravo y L. Vargas Tamayo , «Generación de Modelos de Caminata Bípeda a Través de Diversas Técnicas de Modelamiento,» *Revista Científica Y Tecnológica De La Facultad De Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José De CALDAS*, vol. 2, n° 11, pp. 4-13, Agosto 2007.
- [39] M. Veloso y P. Stone, «Video: RoboCup Robot Soccer History,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, 2012.
- [40] F. Pfeiffer y H. Inoue, «Walking: Technology And Biology,» *The Royal Society*, vol. 365, p. 3–9, Noviembre 2006.
- [41] S. González Mejía, J. Ramírez y E. J. Avella Rodríguez, «Técnicas de Control para el Balance de un Robot Bípedo un Estado del Arte,» *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 19, n° 43, pp. 139-162, Marzo 2015.
- [42] S. M. Orozco Soto y J. M. Ibarra Zannatha, «Sobre la Generación de Patrones de Caminado de Robots Humanoides,» de *Congreso Mexicano de Robotica* , Los Cabos, Mexico, 2015.
- [43] D. Aguilar y A. Vivas, «Modelado y Control de un Robot Bípedo de Nueve Grados de Libertad,» de *VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática*, Cartagena de Indias, Colombia, 2009.
- [44] D. Luo, Y. Wang y X. Wu, «Online Learning of COM Trajectory for Humanoid Robot Locomotion,» de *International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, China, 2012.
- [45] D. Orin, A. Goswami y S.-H. Lee, «Centroidal Dynamics Of a Humanoid Robot,» *Autonomous Robots*, vol. 35, n° 2-3, pp. 161-176, 2013.
- [46] M. Vukobratovic y B. Borovac, «Zero Moment Point — Thirty Five Years of its Life,» *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, n° 1, p. 157–173, 2004.
- [47] R. Luo, P. H. Chang, J. Sheng, S. Cheng Gu y C. H. Chen, «Arbitrary Biped Robot Foot Gaing Based on Variate COM Height,» de *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Atlanta, 2013.
- [48] Y. Aoustin, C. Chevallereau y V. Arakalian, «Study And Optimisation Of A Biped Equipped With Wearable Assist Device,» Nantes, 2014.
- [49] L. E. Contreras Bravo y M. A. Roa Garzón, «Modelamiento De La Marcha Humana Por Medio De Gráficos De Unión,» *Revista Tecnura*, vol. 8, n° 16, pp. 26-42, junio 2005.
- [50] S. Kajita y K. Tani, «Experimental Study of Biped Dynamic Walking,» *Control Systems, IEEE*, vol. 16, n° 1, pp. 13-19, Febrero 1996.
- [51] A. Villalobos, «Estudio de Modelos Simplificados para Máquinas Bípedas Planares,» *Telematique*, vol. 6, n° 1, pp. 1-15, 2007.
- [52] W. Suleiman, F. Kanehiro, K. Miura y E. Yoshida, «Enhancing Zero Moment Point-Based Control Model: System Identification Approach,» *Advanced Robotics* , vol. 1, n° 25 , p. 427–446, 2011.
- [53] S. F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yok y H. Hirukawa, «The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, 2001.



- [54] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi y H. Hirukawa, «A Realtime Pattern Generator for Biped Walking,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02*, Whashington, 2002.
- [55] C. Chevallereau y Y. Aoustin, «Self-Stabilization Of 3D Walking Via Vertical Oscillations Of The Hip,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation* , Seattle, 2015.
- [56] E. Sariyildiz y H. Temeltas, «An Exact Dynamic Model for the Thomas-K Biped Robot: New Simulator Design,» de *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Tianjin, 2014.
- [57] J. Rai, V. Singh, R. Tewari y D. Chandra, «Artificial neural network controllers for biped robot,» de *International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, Allahabad, 2012.
- [58] J. Park y Y. Rhee, «ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, 1998.
- [59] T. H. Li, Y.-T. Su, S.-H. Liu, J.-J. Hu y C.-C. Chen, «Dynamic Balance Control for Biped Robot Walking Using Sensor Fusion, Kalman Filter, and Fuzzy Logic,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, nº 11, pp. 4394-4408, Noviembre 2012.
- [60] D. Kim, S. Seo y G.-T. Park, «Zero-Moment Point Trajectory Modelling Of A Biped Walking Robot Using An Adaptive Neuro-Fuzzy System,» *Control Theory and Applications*, vol. 152, nº 4, pp. 411-426, Julio 2005.
- [61] A. J. Ijspeert, «Design of Artificial Neural Oscillatory Circuits for the Control of Lamprey and Salamander-Like Locomotion Using Evolutionary Algorithms,» Edimburgo, 1998.
- [62] Y. Choi, D. Kim, Y. Oh y B.-J. You, «Posture/Walking Control for Humanoid Robot Based on Kinematic Resolution of CoM Jacobian With Embedded Motion,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, nº 6, pp. 1285 - 1293, 2007.
- [63] F. Xue, X. Chen, J. Liu y D. Nardi, «Real Time Biped Walking Gait Pattern Generator for a Real Robot,» de *RoboCup 2011: Robot Soccer World Cup XV*, 2011.
- [64] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yok y H. Hirukawa, «The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, 2001.
- [65] S. Kajita, O. Matsumoto y M. Saigo, «Real-Time 3D Walking Pattern Generation for a Biped Robot with Telescopic Legs,» de *IEEE International Conference on Robotics & Automation ICRA*, Seoul, Korea, 2001.
- [66] U. A. Jiménez Rioja, «Equilibrio Dinámico de un Robot Bípedo Utilizando el Modelo Simplificado Carro-Mesa,» Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico D.F., Mexico, 2014.
- [67] T. Tsuji y K. Qhnishi, «A Control of Biped Robot Which Applies Inverted Pendulum Mode With Virtual Supporting Point,» de *7th International Workshop on Advanced Motion Control.*, Maribor, Slovenia, 2002.
- [68] T. Suzuki y K. Ohnishi, «Trajectory Planning of Biped Robot With Two Kinds of Inverted Pendulums,» de *12th International Power Electronics and Motion Control Conference* , Portoroz, Slovenia, 2006.
- [69] T. Sugihara, Y. Nakamura, y H. Inoue, «Realtime Humanoid Motion Generation Through Zmp Manipulation Based on Inverted Pendulum Control,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. ICRA '02.* , Washington, Estados Unidos, 2002.
- [70] F. Samadi y H. Moghadam, «Pattern Generation for Humanoid Robot with Natural ZMP Trajectory,» de *International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, 2014.



- [71] S. Kajita, M. Morisawa, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, K. Fujiwara y H. Hirukawa, «Biped Walking Pattern Generator Allowing Auxiliary ZMP Control,» de *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006.
- [72] W.-g. Wu y Y.-y. Hou, «Research on Rapid Walking of Biped Robot Based on Parametric Surface Table Cart Model,» de *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guilin, China, 2009.
- [73] D. A. Bravo Montenegro, «Generación de Trayectorias para un Robot Bípedo basadas en Captura de Movimiento Humano,» Popayán, Colombia, 2016.
- [74] C. Chevallereau, G. Bessonnet, G. Abba y Y. Aoustin, *Bipedals Robots, Modeling, Design and Walking Synthesis*, Francia: LAVOISIER, 2007.
- [75] K. Gordon, D. Ferris y A. Kuo, «Metabolic and Mechanical Energy Costs of Reducing Vertical Center of Mass Movement During Gait,» *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 90, n° 1, pp. 136-144, 2009.
- [76] N. Shafii, N. Lau y L. P. Reis, «Generalized Learning to Create an Energy Efficient ZMP-Based Walking,» de *RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII*, 2014.
- [77] C. Chevallereau y Y. Aoustin, «Self-Stabilization of 3D Walking Via Vertical Oscillations of the Hip,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, Washington, 2015.
- [78] J. Kulk y J. Welsh, «A Low Power Walk for the NAO Robot,» de *Australasian Conference on Robotics and Automation*, Canberra, Australia, 2008.
- [79] M. A. Roa, C. Villegas y D. A. Garzon-Alvarado, «Modelamiento, Estabilidad e Implicaciones Biomecánicas de la Caminata Bípeda Pasiva con Tres Grados de Libertad,» *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, n° 2, pp. 77-84, Agosto 2007.
- [80] G. Guacaneme y D. Pardo, «Diseño e Implementación de un Sistema de Medición de Consumo de Energía Eléctrica y Agua Potable Remoto con Interacción al Usuario Basado en el Concepto “Internet de las Cosas,» Bogota, Colombia, 2016.
- [81] F. Marder, A. Franco y O. Lombardero, «Sensor Lineal de Corriente para Medición de Energía,» de *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, Corrientes, 2003.
- [82] T. Instruments, *Current Shunt Monitors*, Dallas: Texas Instruments Copyright, 2014.
- [83] H. Shuka, B. Corves, W. Hong Zhu y B. Vanderborght, «A Simple Algorithm for Generating Stable Biped Walking Patterns,» *International Journal of Computer Applications*, vol. 101, n° 4, pp. 29-33, Septiembre 2014.
- [84] Y. Choi y D. Kim, «Humanoid Robot Balancing, Advances in Robotics,» *Automation and Control, I-Tech*, vol. 1, n° 1, p. 472, octubre 2008.
- [85] H. Weller, *Fourier Analysis*, 2015.
- [86] S. Suslov, *An Introduction to Basic Fourier Series*, 1 ed., Springer USA, 2003.
- [87] L. Polyakova y V. Karelin, «Exact Penalty Methods for Nonsmooth Optimization,» de *Beam Dynamics and Optimization (BDO) international Workshop*, Saint-Petersburg, 2014.
- [88] P. Galindo Villardo, *Análisis de Relación entre una Variable Cuantitativa y otra Cualitativa*, 2013.
- [89] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J.-H. Oh y J. Lee, «Mechanical Design of the Humanoid Robot Platform, HUBO,» *Advanced Robotics*, vol. 21, n° 11, pp. 1305-1322, Abril 2007.
- [90] B. Dellon y Y. Matsuoka, «Prosthetics, Exoskeletons, and Rehabilitation,» *IEEE Robotics and Automation magazine*, vol. 14, n° 1, p. 30, 2007.
- [91] L. E. Figueroa Medina, «Simulación de Comportamiento de Robots Humanoides en Juego de



- Futbol,» Tesis de Maestría, Mexico, 2011.
- [92] Y.-F. Ho, P.-H. Kuo, P.-C. Huang y T.-H. Li, «Design and Implementation of a Series of Small-Size Humanoid Robots for Fira and Robocup,» de *International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, Tainan, 2013.
- [93] S. Kajita y T. Kazuo, «Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain Theory and Basic Experiment,» de *Advanced Robotics*, Pisa, 1991.
- [94] F. K. K. K. F. K. H. K. Y. y. H. H. S. Kajita, «Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'03*, Taipei, 2003.
- [95] F. K. K. M. E. Y. Wael Suleiman, «Enhancing Zero Moment Point-Based Control Model: System Identification Approach,» *Advanced Robotics*, vol. 25, n° 3, pp. 427-446, Enero 2011.
- [96] J. J. Tacie Gonzalez, H. F. Naranjo Mage y C. F. Rengifo Rodas, «Simulación del Ciclo de Marcha del Robot Bipedo Bioloid en el Entorno Virtual V-REP,» de *Congreso Mexicano de Robotica*, Los Cabos, Mexico, 2015.