



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

**MODELO HEURÍSTICO PARA REPRODUCCIÓN DE TRAYECTORIAS DE
DESPLAZAMIENTO CON UN ROBOT CUADRÚPEDO ARTICULADO**

ESTUDIANTE:

SANDRO FRANCISCO BALAREZO GALLARDO, ING.

DIRECTOR:

JESÚS ANTONIO HERNÁNDEZ RIVEROS, PHD.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Dpto. Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia
2019

**MODELO HEURÍSTICO PARA REPRODUCCIÓN DE TRAYECTORIAS DE
DESPLAZAMIENTO CON UN ROBOT CUADRÚPEDO ARTICULADO**
**“HEURISTIC MODEL FOR REPRODUCTION OF DISPLACEMENT PATHS WITH
AN ARTICULATED QUADRUPED ROBOT”**

SANDRO FRANCISCO BALAREZO GALLARDO, ING.

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

Director:
JESÚS ANTONIO HERNÁNDEZ RIVEROS, PHD.

Línea de Investigación: Sistemas de Ingeniería Inteligentes
Grupo de Investigación en Inteligencia Computacional - GIIC

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia
2019

DEDICATORIA

A Dios, a San Francisco de Asís, a Santa Narcisa de Jesús y a la Virgen María, como parte de mis creencias y mi Fé, por la paciencia, esperanza y fortaleza que me dan día a día para poder enfrentar los retos de la vida con mucha alegría, por permitirme amar y perdonar.

A Mis Amados Padres, a mi Mamá, por su constante lucha, todo lo que soy se lo debo a ella, a su esfuerzo y a su incansable oración. A mi Papá, por su paciencia y apoyo incondicional, por estar pendiente de cada reto, de cada sueño que me he propuesto y por hacerme ver las cosas desde otro punto de vista, siempre pensando en lo mejor para mí.

A mi hermanita consentida, por su amistad, su comprensión, su compañía, su tiempo dedicado a escuchar y a dar los mejores consejos, Galy te quiero mucho, este logro también es tuyo.

A todos mis tíos y primos que nunca me han abandonado, siempre estuvieron pendientes de mí y animándome para cumplir con este sueño.

A mis amigos y amigas por sus buenos deseos, sus oraciones y sus consejos, siempre estaré agradecido con todas las personas que fueron parte de este logro académico.

Que Dios nos bendiga a todos.

RESUMEN

Las nuevas técnicas de inteligencia computacional han tenido un crecimiento significativo en los últimos 15 años en el desarrollo de nuevos sistemas de robots articulados inspirados en el comportamiento de los seres vivos. En este documento se presenta un modelo heurístico de estimación evolutiva capaz de emular la locomoción de un equino en modo caminata mediante un robot cuadrúpedo articulado de tres articulaciones por pata llamado R4A3. El sistema de locomoción está basado en un conjunto de señales generadas por un método biológico llamado generadores centrales de patrones (CPG).

Palabras clave:

CPG, Modelo Heurístico, Locomoción, Cuadrúpedo articulado

ABSTRACT

The new techniques of computational intelligence have had a significant growth in the last 15 years in the development of new systems of articulated robots inspired by the behavior of living beings. This paper presents a heuristic model of evolutionary estimation capable of emulating the locomotion of an equine in walking mode by means of an articulated quadruped robot with three joints per leg called R4A3. The locomotion system is based on a set of signals generated by a biological method called central pattern generators (CPG).

Keywords:

CPG, Heuristic Model, Locomotion, Articulated Quadruped

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCION	1
2. CASO DE ESTUDIO	3
3. OBJETIVOS	4
3.1 General	4
3.2 Específicos	4
4. LOCOMOCIÓN ANIMAL	5
4.1 Locomoción en Bipedos	5
4.2 Locomoción en Cuadrupedos	6
5. ROBÓTICA	8
5.1 Robots Estáticos	8
5.2 Robots Móviles	9
5.3 Robots Articulados	11
6. GENERADORES CENTRALES DE PATRONES (CPG)	16
6.1 Redes Neuronales Artificiales	17
6.2 Sistema CPG R4A3	18
7. ALGORITMO MULTIDINÁMICAS PARA OPTIMIZACIÓN GLOBAL (MAGO)	21
8. SEÑALES BIOINSPIRADAS	24
8.1 Procesamiento De Señales	26
8.2 Modelo Heurístico De Estimacion Evolutiva	28
8.3 Parametros Sistema CPG R4A3	30
9. DISEÑO DEL ENTORNO DE SIMULACION	31
9.1 Configuración del Robot R4A3 y su Entorno	31
9.1 Implementación del Sistema CPG	32
10. SIMULACION ROBOT R4A3	35
10.1 Pruebas de Simulacion	37
11. ANALISIS COMPARATIVO	42
12. CONCLUSIONES	45
13. BIBLIOGRAFÍA	46

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Estructura esquelética de un humano (izquierda) y de un gorila (derecha).....	5
Figura 2: Caballo en paso trote.....	6
Figura 3: Robots Universales de Rossum	8
Figura 4: Robot Industrial Unimate.....	8
Figura 5: Locomoción en robots móviles.....	11
Figura 6: Mecanismo 4 barras de Chebyshev.....	11
Figura 7: Funcionamiento de un generador central de patrones.	16
Figura 8: Sistema de locomoción basado en CPG.....	17
Figura 9: A) Red de trayectoria directa y B) Red recurrente.....	18
FIGURA 10: A) CPG DOS NEURONAS, B) CPG CUATRO NEURONAS.....	19
Figura 11: Respuesta y_1 , y_2 , y_3 , y_4 : Movimiento oscilatorio de la red neuronal recurrente.	20
Figura 12: (a) Generación 0 (b) Generación 5 (c) Generación 15.	23
Figura 13: Posiciones en locomoción de un equino.	24
Figura 14: Medición de ángulos en las articulaciones de un equino.....	25
Figura 15: Posiciones del equino mediante vectores.	25
Figura 16: Variación de ángulos en el tiempo.	26
Figura 17: Proceso de estimación evolutiva.....	28
Figura 18: Configuración del entorno de simulación para el R4A3.....	31
Figura 19: Configuración de una pata bajo condiciones físicas reales.	32
Figura 20: Implementación del Sistema CPG para locomoción en modo caminata.	32
Figura 21: Sistema CPG y robot R4A3.	33
Figura 22: a) $Y_1 - DD1$ b) $Y_2 - DD2$ c) $Y_3 - DD3$	36
Figura 23: a) $Y_1 - TD1$ b) $Y_2 - TD2$ c) $Y_3 - TD3$	36
Figura 24: Robot R4A3 en SIMSCAPE.	39
Figura 25: Variabilidad de la plataforma del cuadrúpedo R4A3.....	41
Figura 26: Robot R4A3 con un peso adicional de 0.6Kg sobre su plataforma.	43

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Evolución de los robots móviles.	9
Tabla 2: Robots cuadrúpedos articulados vs cuadrúpedos con ruedas.	12
Tabla 3: Parámetros utilizados en el Sistema R4A3.	19
Tabla 4: Remuestreo y extensión de señales originales bioinspiradas en la locomoción de un equino.	27
Tabla 5: Parámetros de locomoción modo caminata del robot R4A3.	30
Tabla 6: Codificación de un Oscilador Acoplado CPG.	33
Tabla 7: Posiciones angulares de las extremidades de un equino en modo caminata.	35
Tabla 8: Modelo de osciladores acoplados basado en CPG y KMP's.	37
Tabla 9: Diseños 3D del cuadrúpedo R4A3 y el Cheetah Cub.	37
Tabla 10: Retardo práctico aplicado a las señales de las articulaciones DD1, DD2 Y DD3.	38
Tabla 11: Dimensiones del Cuadrúpedo R4A3 en SIMSCAPE.	39
Tabla 12: Robot R4A3 en locomoción modo caminata.	40
Tabla 13: Vista superior de la trayectoria de desplazamiento del robot R4A3 sobre una superficie plana.	41
Tabla 14: Frecuencia de paso de 0.97Hz.	40
Tabla 15: Variación de amplitudes en las señales CPG a una frecuencia de paso de 3.25Hz.	42
Tabla 16: Pruebas de funcionamiento con un peso adicional de 0.6Kg en distintas ubicaciones sobre el cuadrúpedo R4A3 a una frecuencia de paso de 3.25Hz.	44

1. INTRODUCCION

La bioinspiración robótica se basa fundamentalmente en la reproducción del comportamiento natural de los seres vivos y en las teorías Darwinianas de la evolución para solucionar problemas de estabilidad, movilidad, evasión de obstáculos y adaptabilidad en la locomoción de robots articulados bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc. Una de las técnicas para modelos de locomoción relativamente nueva y con mayor potencial para solucionar estos problemas son los Generadores Centrales de Patrones (CPG – Central Pattern Generator). Los CPG pueden implementarse bajo redes neuronales recurrentes, tienen pocos parámetros de control, y su implementación puede ser en un sistema de control sin retroalimentación [1].

Los métodos de control tradicionales se basan en la obtención previa del modelo matemático del robot y de la trayectoria de desplazamiento en un entorno conocido previamente. Existen métodos determinísticos para solucionar los problemas de locomoción en los robots cuadrúpedos articulados, el inconveniente que presentan es que se debe contar con los modelos matemáticos específicos y tienen un costo computacional elevado. Varios de estos métodos miden su efectividad de control con una relación entre la longitud máxima de paso y el levantamiento mínimo del pie, esto puede ser traducido como un sistema eficiente de energía [2].

En el presente proyecto de Tesis de Maestría se emula la locomoción de un equino, en modo caminata, mediante un robot cuadrúpedo articulado de 3 articulaciones por pata. Este proyecto se basa en un trabajo previo desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia (Facultad de Minas) que consiste en la aplicación de CPG como sistema de locomoción para un robot cuadrúpedo de 3 articulaciones por pata (R4A3). El CPG está desarrollado con base en redes neuronales recurrentes y representadas por 4 ecuaciones diferenciales con 11 incógnitas o variables. [3]. Para lo cual se analizó una secuencia de imágenes obtenida de [4], en donde se puede observar a un equino realizando locomoción en modo caminata, de su análisis se obtuvieron las señales bioinspiradas que describen el movimiento de las 3 articulaciones más importantes de las extremidades delantera y trasera del equino. Mediante el modelo heurístico de estimación de parámetros desarrollado en este documento y publicado en [5] se estiman los 11 parámetros del CPG desarrollado previamente en [3] para emular las señales bioinspiradas. Se simula el comportamiento del robot R4A3 con el sistema de locomoción basado en CPG en

una superficie plana y con la inclusión de condiciones físicas reales. El objetivo trazado para la tesis se cumplió y se extendió a variaciones de la caminata por modificación de la frecuencia del paso. Finalmente, modificando la amplitud de las señales se descubrió que los CPG pueden generar comportamiento emergente y se logró invertir la marcha del R4A3.

El presente documento está organizado de la siguiente forma:

Capítulo 2 Caso de Estudio, expone el tema de trabajo de la tesis de maestría.

Capítulo 3 Objetivos, presenta el enfoque de trabajo de la tesis de materia.

Capítulos 4, 5, 6, y 7, presentan las teorías en las que se soporta el control de locomoción en robots articulados.

Capítulos 8, 9, y 10, desarrollo de la solución de la tesis de maestría.

Capítulos 11 y 12, muestran las conclusiones de la investigación realizada.

2. CASO DE ESTUDIO

En un trabajo previo desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia se utilizó el método biológico CPG (Central Pattern Generator) para que un robot cuadrúpedo articulado (R4A3) de 3 articulaciones por pata sea capaz de realizar locomoción sobre una superficie plana. En este caso, los CPG fueron utilizados como señales de activación y sincronización de los movimientos de cada una de las articulaciones (tres) de las 4 patas. Los osciladores acoplados que describen el comportamiento de los CPG fueron desarrollados a través de un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, la ventaja de este sistema es que se puede implementar en hardware. Estas ecuaciones diferenciales fueron desarrolladas en [3] y aplicando una solución de métodos numéricos como Euler se logró sincronizar los movimientos de las extremidades del robot para que este sea capaz de realizar locomoción en modo caminata.

En esta tesis se propone la utilización del mismo sistema de ecuaciones diferenciales [3] para emular mediante CPG las señales bioinspiradas en la variación angular de las articulaciones de un equino realizando locomoción en modo caminata. Este sistema de ecuaciones consta de 11 incógnitas o variables y solamente dispone de 4 ecuaciones, es decir, para una determinada salida o solución del sistema existen infinitas combinaciones posibles de sus parámetros. Por lo tanto, se desarrolló un modelo heurístico evolutivo de estimación de parámetros capaz de calcular una combinación de éstos 11 parámetros para lograr una correlación lineal de los CPG con las señales bioinspiradas en la locomoción de un equino. Por último, se simuló el comportamiento de la locomoción del cuadrúpedo R4A3 con el sistema CPG y los parámetros estimados por el modelo heurístico evolutivo.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

- Desarrollar un modelo heurístico basado en generadores centrales de patrones (CPG) que permita reproducir una trayectoria de desplazamiento mediante la simulación de un robot cuadrúpedo articulado en una superficie terrestre plana.

3.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar los tipos más importantes de locomoción utilizados por los cuadrúpedos naturales para desplazarse.
- Determinar las técnicas de inteligencia computacional que permitan reproducir de forma adecuada la locomoción natural, para elaborar el modelo heurístico de desplazamiento de un robot cuadrúpedo articulado.
- Validar mediante simulación la respuesta del modelo heurístico desarrollado para reproducción con un robot cuadrúpedo articulado de trayectorias de desplazamiento dadas.

4. LOCOMOCIÓN ANIMAL

El término locomoción viene del latín *loco* que significa “desde un lugar” y *motio* que significa “movimiento”. Los animales se desplazan o realizan locomoción por varios motivos, dentro de los cuales tenemos: encontrar alimentos, nuevo hábitat, reproducción, escapar de los predadores, etc. [6]

La locomoción en los animales requiere de un mecanismo de propulsión (músculos) y de un mecanismo de control. La calidad, cantidad y posición de las contracciones musculares están controladas por el sistema nervioso de los animales. La locomoción animal se puede realizar en cuatro entornos: aéreo, acuático, fosorial (subterráneo) y terrestre.

Existen fuerzas que se oponen o facilitan la locomoción animal como la gravedad y las fuerzas de rozamiento. La gravedad es ligeramente más importante en los entornos aéreo, fosorial y terrestre para lo cual los animales han desarrollado sistemas esqueléticos con el fin de soportar su cuerpo. En el entorno acuático la fuerza principal que interactúa con la locomoción se denomina arrastre.

Los animales pueden desplazarse de un lugar a otro autopropulsados, por ejemplo, correr, nadar, saltar, volar, brincar, elevarse y deslizarse. Algunos animales utilizan la locomoción pasiva para desplazarse, es decir, dependen de las condiciones del medio ambiente para poder moverse de un lugar a otro. [7]

4.1 LOCOMOCIÓN EN BIPEDOS

El humano moderno es el único animal que realiza locomoción bípeda todo el tiempo, es decir, camina sobre dos piernas en una posición erguida [8]. El consumo de energía en el modo caminata para los bípedos se reduce al mínimo fisiológico por el movimiento suave ondulatorio de las articulaciones y los músculos del cuerpo. En la Figura 1 podemos observar varias diferencias que le permiten caminar en dos piernas al ser humano, como, por ejemplo: el tamaño de la pelvis y la longitud del fémur.

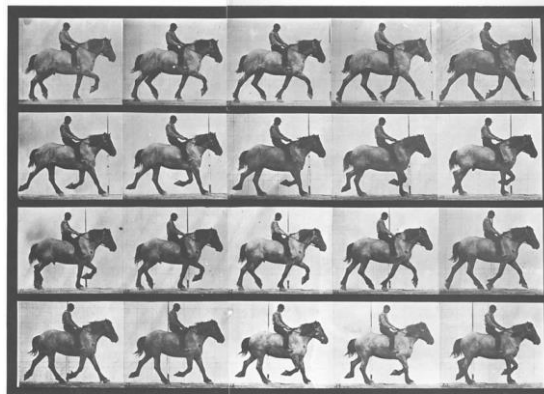
Figura 1: Estructura esquelética de un humano (izquierda) y de un gorila (derecha) [9].



4.2 LOCOMOCIÓN EN CUADRUPEDOS

Uno de los avances más importantes para determinar las características de la locomoción natural en los cuadrúpedos fueron realizados por el trabajo fotográfico pionero de E. Muybridge [4]. En este documento se puede observar un conjunto de imágenes de varios animales en estado de locomoción. De estos estudios podemos concluir que los animales tienen distintos tipos de locomoción, y los más importantes son la caminata, el trote y el galope. En la Figura 2 se puede observar una secuencia de fotografías de un caballo y un jinete en paso trote.

Figura 2: Caballo en paso trote [4].



El autor Muybridge con sus estudios define siete diferentes tipos de pasos para los animales de la naturaleza:

- **Caminata:** Movimiento de una pierna a la vez, única caminata estáticamente estable.
- **Caminata Rápida:** Más rápido que la caminata normal, el soporte del cuerpo se alterna entre una y dos patas.
- **Trote:** El soporte del cuerpo está dado por el par de pies diagonales.
- **Paso "Rack":** El soporte está dado por el par de pies laterales y no diagonales como en el trote.
- **Paso "Canter":** Es más rápido que el trote, pero más lento que el galope, no se puede distinguir entre derecha e izquierda.
- **Galope:** Es el tipo de paso más rápido que desarrollan los cuadrúpedos, saltando hacia adelante con sus patas traseras para luego caer sobre las delanteras. Biológicamente se distinguen dos diferentes tipos de galope.
 - **Galope Transversal:** El patrón de los pies que caen se mueve transversalmente.

- **Galope Rotatorio:** El patrón de los pies que caen se mueve cíclicamente alrededor del cuerpo.
- **Paso “Ricochet”:** Son secuencias de movimientos como saltos, esquivar, etc. Típicos de los marsupiales de Australia como los canguros.

5. ROBÓTICA

La palabra “ROBOT” apareció por primera vez 1921 en una obra llamada RUR (Robots Universales de Rossum) como se muestra en la Figura 3.

Figura 3: Robots Universales de Rossum [10].



Para clasificar a los robots se pueden considerar varios criterios como: su generación, su arquitectura, el nivel de inteligencia, el nivel de control o el nivel de su lenguaje de programación. Respecto a su estructura tenemos a los robots estáticos y los robots móviles [11].

5.1 ROBOTS ESTÁTICOS

En 1954 un ingeniero llamado George Devol desarrolla una patente para el primer brazo robótico llamado “Transferencia programada de artículos”. En 1961 George Devol y Joseph Engelberger desarrollan el primer robot industrial llamado Unimate de 2700 libras y lo instalan en General Motors en Trenton, Nueva Jersey como manipulador de piezas en el área de fundición a presión [12].

En la Figura 4 se puede observar al robot industrial Unimate, sus movimientos se realizaban a través de un sistema hidráulico, el sistema de control estaba basado en el control digital, constaba de una memoria de tambor magnético y elementos de control en estado sólido discreto [13].

Figura 4: Robot Industrial Unimate [10].

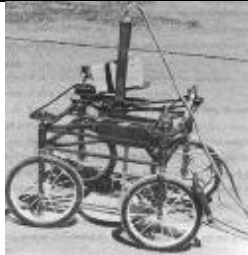
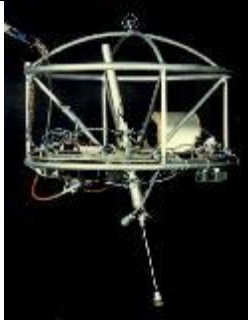



5.2 ROBOTS MÓVILES

Un robot móvil se define como: *un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto. Posee sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa a su punto de origen y a su punto de destino. Normalmente su control es en lazo cerrado. Su desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales como ruedas, patas, orugas, etc.* [11].

En la Tabla 1 se puede observar la evolución de algunos de los robots más importantes con sus proyectos más significantes.

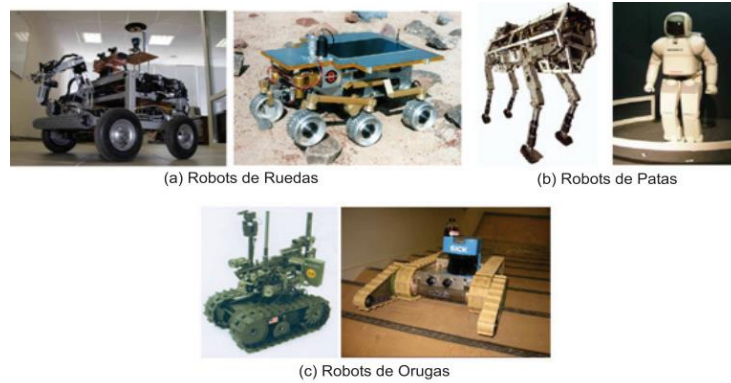
Tabla 1: Evolución de los robots móviles [11].

Año	Descripción	Robot
1961	Stanford Cart: Robot capaz de seguir una trayectoria establecida en una superficie. Desarrollado: Universidad de Stanford.	 A black and white photograph of the Stanford Cart, a three-wheeled robot with a complex mechanical structure on top, including a vertical pole and various sensors.
1983	Raibert: Robot de una sola pata, desarrollado para estudiar la estabilidad y obtener información sobre la locomoción de estos robots. Desarrollado: Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).	 A photograph of the Raibert robot, a single-legged robot with a complex mechanical structure, shown in a dynamic pose as if walking or jumping.
1994	Dante II: Sistema de 6 patas para obtener muestras de gases de un volcán en Alaska. Desarrollado: Instituto de Robótica CMU.	 A photograph of the Dante II robot, a six-legged robot with a complex mechanical structure, shown in a snowy environment.

1996	<p>Spring Flamingo: Robot que emulaba el comportamiento de un flamenco, dando origen al control de posición de actuadores (patas) y a diversos algoritmos de desplazamiento.</p> <p>Desarrollado: Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).</p>	
1997	<p>Sojourner Rover: Robot enviado a Marte para realizar fotografías del entorno del planeta.</p> <p>Desarrollado: NASA</p>	
1997	<p>P3: Primer robot humanoide que imitaba los movimientos humanos.</p> <p>Desarrollado: HONDA</p>	
1998	<p>WABIANR-III: robot humanoide desarrollado para estudiar el movimiento del cuerpo humano.</p> <p>Desarrollado: Universidad Waseda de Japón.</p>	
1999	<p>Bow Leg Hopper: Nuevo diseño de un robot con una sola pata, pero esta articulación es curva y le permite almacenar la energía potencial de la pata.</p> <p>Desarrollado: Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)</p>	

Los robots móviles también se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de mecanismo de locomoción que utilicen para su desplazamiento, por lo general se clasifican en: robots por ruedas, robots por patas y robots por orugas. En la Figura 5 se puede observar los tipos de locomoción en robots [11].

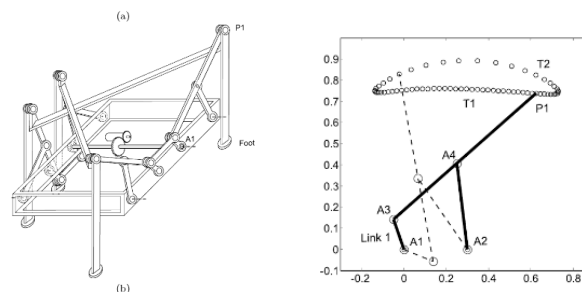
Figura 5: Locomoción en robots móviles [11].



5.3 ROBOTS ARTICULADOS

El primer diseño documentado de un mecanismo articulado fue desarrollado por Chebyshev en 1870, constaba de cuatro patas rígidas y su funcionamiento era mecánico como se muestra en la Figura 6. A mediados de la década de 1970 se probó el primer controlador computarizado para un robot con patas en la Universidad del Estado de Ohio. Siendo esto como el punto de partida para los investigadores de universidades Americanas y Japonesas [14].

Figura 6: Mecanismo 4 barras de Chebyshev [14].



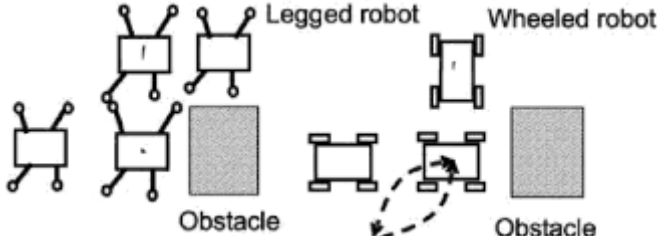

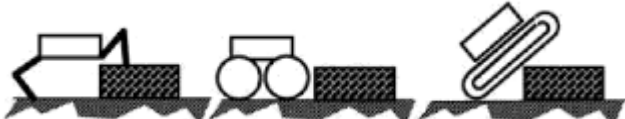



Mediante la revisión de la literatura se puede concluir que para superar obstáculos o caminar sobre superficies irregulares los robots cuadrúpedos son más estables y poderosos que los robots bípedos [15]. Actualmente podemos distinguir dos tipos de robots cuadrúpedos, uno a base de ruedas y otro a base de articulaciones.


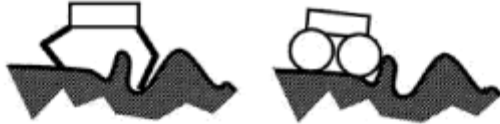
- **Robots Cuadrúpedos con Ruedas:** La configuración cinemática de estos robots depende básicamente de la aplicación que se le dará al mismo. Estos modelos son competentes en superficies planas sin obstáculos en las cuales pueden alcanzar altas velocidades pero tienen problemas de estabilidad, adaptabilidad y movilidad en superficies irregulares, limitándolos en su aplicación [14].

- Robots Articulados:** Existen dos puntos importantes en el diseño de estos robots articulados, uno de ellos es la coordinación que debe existir entre las diferentes extremidades y el segundo aspecto es el movimiento que debe realizar cada una de las articulaciones de una extremidad. Las articulaciones pueden ser de movimiento rotacional o lineal, lo cual presenta una ventaja más sobre los modelos a base de ruedas. Los cuadrúpedos articulados naturales son los dominantes de la superficie terrestre por sus distintos tipos de locomoción y adaptabilidad a superficies irregulares [16].

En la Tabla 2 se pueden identificar la diferencias entre los robots cuadrúpedos articulados y los robots cuadrúpedos con ruedas bajo diferentes circunstancias [14].

Tabla 2: Robots cuadrúpedos articulados vs cuadrúpedos con ruedas [14].

Movilidad	 <p>Legged robot Wheeled robot Obstacle Obstacle</p>
Movilidad	 <p>Positioning Heading Levelling</p>
Superación Obstáculos	
Suspensión Activa	
Terrenos Naturales No Continuos	
Deslizamiento y Bloqueo	 <p>Resistance Motion</p>

Daños al Medio Ambiente	
Velocidad Media	

Los robots cuadrúpedos articulados aún tienen problemas que no han sido solucionados en su totalidad, como un tipo adecuado de locomoción, transiciones de movimientos, evasión de obstáculos y adaptabilidad a entornos no conocidos previamente y a superficies irregulares. [17]

Algunos autores [18] exponen cómo influyen las trayectorias de desplazamiento del pie sobre la estabilidad, cambio de velocidad de caminado y la eficiencia al caminar de un robot cuadrúpedo articulado.

Los problemas antes mencionados pueden ser ocasionados por la dificultad de reproducir el comportamiento natural de los seres vivos. Los animales de cuatro patas son capaces de superar todos estos inconvenientes de forma eficaz y sin modificar su estructura física, únicamente adoptando distintas posiciones, un tipo de locomoción adecuado y precisión en su movimiento.

Los retos actuales de los robots cuadrúpedos articulados están enfocados en la inclusión de motores hidráulicos para mejorar el rango poder-peso, respuestas más rápidas, estabilidad robusta, sistemas de locomoción eficientes y capacidad de largo alcance al caminar [17].

Se cree que superados estos inconvenientes se podrá tener una aplicación práctica de estos robots, para lo cual se están utilizando las técnicas de identificación de terrenos irregulares, fusión de información, generación de tipos de pasos, retroalimentación de posición y fuerza, planeamiento de trayectorias de desplazamiento del pie y del cuerpo del robot, estrategias de control de estabilidad, etc. [17].

Marc Raibert, el fundador de Boston Dynamics en 1995 y actual director dijo en una entrevista para "MIT Technology Review" que: "los humanos y los animales tienen una movilidad extraordinaria, más que cualquier vehículo creado por un humano, así que tiene sentido hacer robots con piernas" [19].

Existen proyectos con alternativas de solución, los cuales se muestran a continuación:

- a) En [2], los autores desarrollan un modelo para estabilidad en condiciones dinámicas de un cuadrúpedo articulado con dos articulaciones rotacionales y una articulación lineal por pata. Utilizando la técnica de Bond Graph diseñan un controlador para que el cuadrúpedo pueda mantener una trayectoria lineal mientras realiza locomoción en modo trote. El paso trote es bioinspirado en la locomoción de un caballo y para evaluar el desempeño del modelo expuesto se basan en la eficiencia energética. Los autores concluyen que un robot cuadrúpedo con patas compatibles, es decir, con articulaciones rotacionales y lineales, es más eficiente energéticamente que un cuadrúpedo con patas rígidas articuladas. Sin embargo, esta técnica tiene un alto costo computacional, el hardware utilizado es muy costoso, lo cual limita su aplicación a otros robots articulados. Adicionalmente este robot no es capaz de reproducir trayectorias de desplazamiento y no cuenta con un software de simulación.
- b) Otros autores [20] presentan un controlador CPG con redes neuronales recurrentes y series de Fourier para que el robot cuadrúpedo AIDIN III sea capaz de reproducir formas de onda arbitrarias bajo ciertas condiciones, estas señales de entrada pueden ser de la ubicación del pie, perfil de velocidad del pie, etc. Los autores concluyen que los CPG han sido muy populares en la inspiración biológica para control de locomoción en cuadrúpedos artificiales. La retroalimentación sensorial tiene un gran efecto sobre la funcionalidad de las salidas que controlan los motores del robot, la relación entre la estructura CPG y la estructura del robot son indiscutibles. Como trabajos futuros pretenden analizar las relaciones antes mencionadas y mejorar el rendimiento del sistema de control basado en CPG. Cabe recalcar que el robot AIDIN III cuenta con sensores, actuadores muy costosos y se aplicó un sistema de control con retroalimentación, lo cual limita la reproducción de este trabajo en otro robot articulado.
- c) Los autores en [21] realizan un sistema de control de la trayectoria de movimiento basado en cinemática, en la dinámica que depende de la fase de apoyo y la fase de impulsión del desplazamiento del robot. En este proyecto se consideró la estabilidad, flexibilidad y velocidad de locomoción. El proyecto propone un algoritmo para planeación de movimiento con un sistema de control compatible para adaptar la locomoción de un cuadrúpedo a una superficie plana con obstáculos convexos y zonas prohibidas. En trabajos futuros pretenden explorar superficies en un ambiente externo con un sistema de locomoción autónomo.

Cabe recalcar que el robot cuenta con un sistema de visión estereoscópica muy costosa y un alto costo computacional.

- d) Los autores en [22] parten de la adquisición y evaluación de información del terreno sobre el cual se va a desplazar el robot cuadrúpedo, con estos datos se genera una serie de puntos de apoyo apropiados para mantener la estabilidad y desarrollar un movimiento seguro. La estabilidad dinámica para movimientos lentos se controla manteniendo el centro de gravedad o centroide en un triángulo formado por tres patas, para velocidades más altas se aplicó la técnica de ZMP (Punto de Momento Cero) el cual debe estar siempre dentro del triángulo de soporte para mantener estabilidad. Para el sistema de control se utiliza un control proporcional derivativo (PD) y la dinámica inversa.

Adicionalmente, la Universidad Nacional de Colombia (Facultad de Minas) cuenta con un proyecto de tesis de maestría [3], en la cual se presenta un sistema de control basado en CPG para un robot cuadrúpedo articulado llamado R4A3. Este robot posee 3 articulaciones rotacionales por pata y es capaz de desplazarse en modo caminata por una superficie terrestre plana. El sistema CPG diseñado para el robot está basado en redes neuronales recurrentes y ecuaciones diferenciales de segundo orden. Sin embargo, este sistema de control de locomoción carece de robustez, aunque el tipo de locomoción es mecánica y no bioinspirado, este robot articulado no es capaz de reproducir otras trayectorias de desplazamiento.

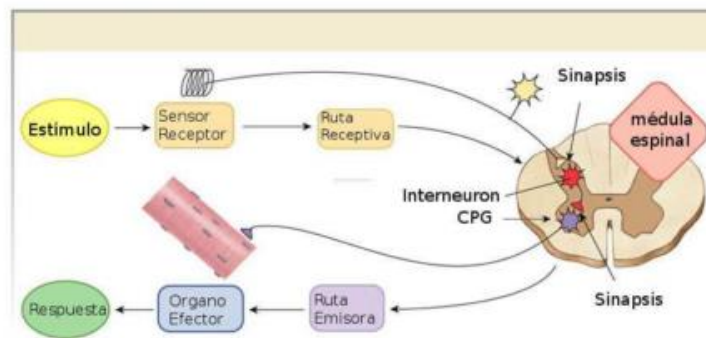
6. GENERADORES CENTRALES DE PATRONES (CPG)

Se ha establecido que los seres vivos cuentan con un controlador central (cerebro) y con generadores centrales de patrones (CPG) en la médula espinal. Los CPG son capaces de generar señales para producir movimientos rítmicos voluntarios como caminar, volar, nadar e incluso para movimientos involuntarios como el latir del corazón, parpadeo en los ojos, tics, etc. [20].

A mediados de la década de 1980 surge un cambio de paradigma en el control de la motricidad. Mediante experimentos Baev y Shimansky demostraron que las tareas motoras voluntarias, como alcanzar, agarrar, soltar y movimientos rítmicos, se podrían realizar mediante deafferentación, es decir, sin la inclusión de sensores. Este nuevo concepto de control-motor fue definido por Marsden y sus colegas como: *“un conjunto de comandos musculares que están estructurados antes que un movimiento comience y que se pueden enviar al músculo con la sincronización correcta de manera que toda la secuencia se lleva a cabo en ausencia de un periférico de realimentación”* [23].

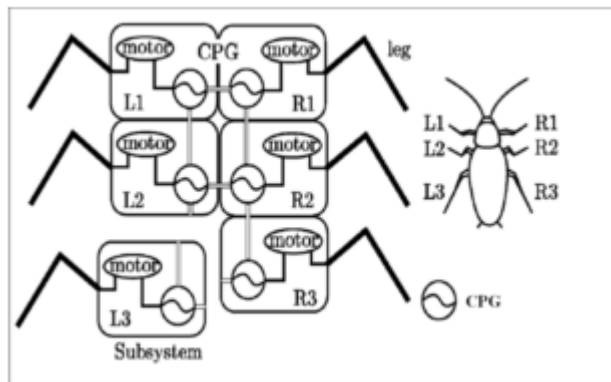
En la Figura 7 se puede observar el funcionamiento del generador central de patrones para realizar locomoción en un animal vertebrado.

Figura 7: Funcionamiento de un generador central de patrones [1].



Los CPG son vistos como redes de sistemas no lineales acoplados. El modelado se logra a través de ecuaciones diferenciales acopladas. En un robot cuadrúpedo articulado los CPG implementados con redes neuronales presentan una gran ventaja al controlar sus movimientos rítmicos y sincronizados. Con esta configuración se puede tener un controlador central y varios controladores distribuidos, sincronizados todos entre sí. En la Figura 8 se puede observar un sistema de locomoción basado en CPG y bioinspirado en un insecto [1].

Figura 8: Sistema de locomoción basado en CPG [1].



Estos sistemas de locomoción para robots articulados están siendo cada vez más utilizados. Actualmente existen varios modelos de robots bioinspirados como Baby Elephant [15], BigDog, Cheetah [24], [25], HyQ, LittleDog [26], Tekken [27].

La Universidad Nacional de Colombia cuenta con una Tesis de Maestría en la cual se ha realizado la simulación de un modelo de locomoción para un robot cuadrúpedo con tres articulaciones por pata mediante CPG [3].

6.1 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales (RNA) están inspiradas en la estructura y funcionamiento de las neuronas del cerebro humano y los sistemas nerviosos, los primeros avances en este campo fueron en 1936 por Alan Turing quien estudio el cerebro humano como una forma de ver el mundo de la computación [28].

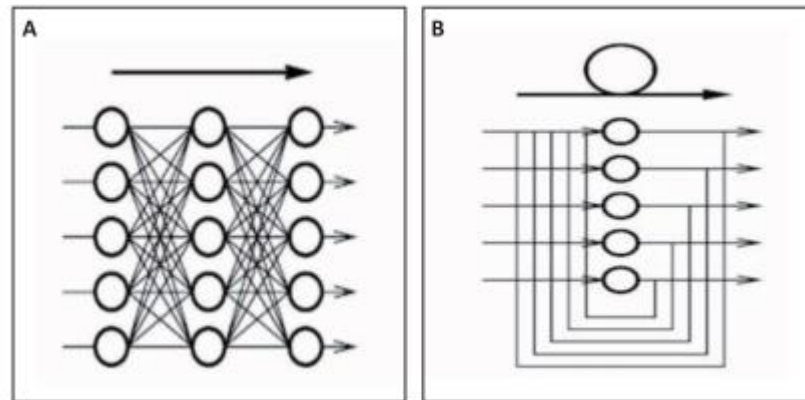
Las redes neuronales artificiales están enfocadas al reconocimiento de patrones a partir de aprendizaje, es decir, reproducen la función de aprender con la que cuentan los humanos para mejorar sus respuestas con cada acción de control. En la década de 1960 se aplicaron por primera vez con la regla delta de aprendizaje Widrow y Hoff. [29].

Por el tipo de conectividad se destacan dos clases de redes neuronales artificiales:

- **Redes de Trayectoria Directa o Indirecta:** el flujo de datos es hacia adelante o hacia atrás entre capas, o entre neuronas, iniciando con las entradas y finalizando en la salida.
- **Redes Recurrentes:** estas redes se caracterizan por tener una retroalimentación entre neuronas o en las mismas neuronas. Son utilizadas para generar señales cíclicas en el tiempo, pueden evolucionar hasta tener valores de activación estables y sin variación.

En la Figura 9 se muestra una clasificación de las redes neuronales artificiales de acuerdo con el tipo de conexión.

Figura 9: A) Red de trayectoria directa y B) Red recurrente [30].



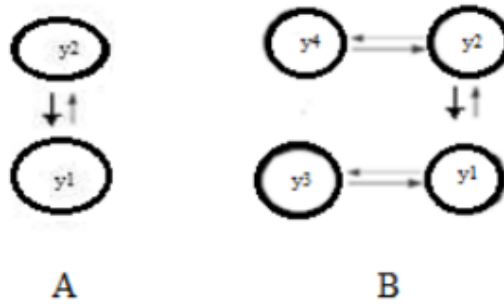
Otra forma de clasificar las redes neuronales es mediante el modo de aprendizaje, el cual puede ser:

- **Supervisado o asociativo:** Se entrena la RNA aplicando pares de patrones, es decir, se suministran como datos a la red las salidas deseadas para entradas específicas.
- **No Supervisado o auto-organizado:** La RNA produce una salida para responder de acuerdo con un conjunto o agrupación de entradas. Entonces el sistema descubre las características principales de las entradas suministradas para generar dicha salida [30].

6.2 SISTEMA CPG R4A3

Se ha seleccionado el oscilador acoplado desarrollado en la tesis de maestría [3] en la Universidad Nacional de Colombia correspondiente a un robot cuadrúpedo articulado con tres articulaciones por pata, R4A3. Una de las configuraciones estudiadas en este sistema CPG es de cuatro y dos neuronas, como se puede observar en la Figura 10.

FIGURA 10: A) CPG Dos Neuronas, B) CPG Cuatro Neuronas [3].



La representación matemática del sistema CPG R4A3 de cuatro neuronas es la siguiente:

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \left(-y_1 + \frac{A(k_1 - Dy_2)^3}{(B + by_3)^2 + (k_1 - Dy_2)^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{1}{\tau_2} \left(-y_2 + \frac{A(k_2 - Dy_1)^3}{(B + by_4)^2 + (k_2 - Dy_1)^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = \frac{1}{\tau_3} (-y_3 + Cy_1^2) \quad (3)$$

$$\frac{dy_4}{dt} = \frac{1}{\tau_4} (-y_4 + Cy_2^2) \quad (4)$$

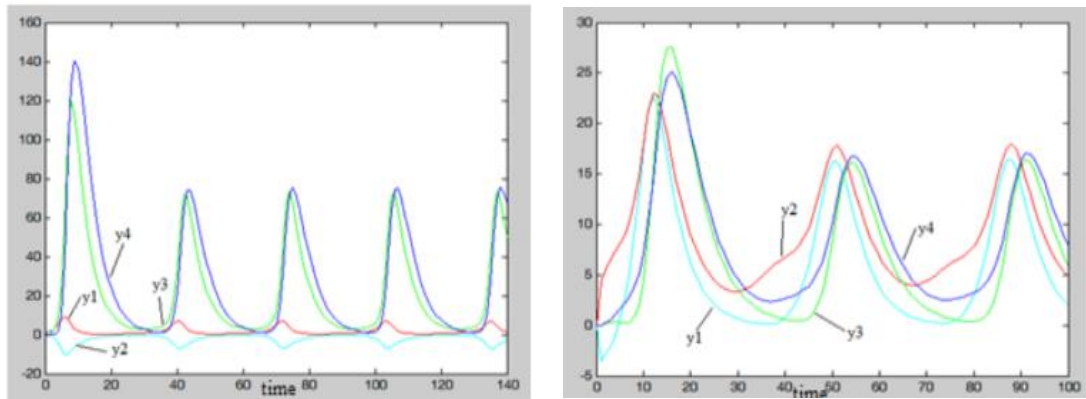
Este sistema oscilatorio contiene 4 ecuaciones diferenciales con 11 incógnitas $A, B, C, D, b, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, k_1, k_2$, las cuales requieren ser estimadas para obtener el comportamiento deseado. En la

Figura 11 se puede observar una respuesta típica del Sistema mediante las salidas y_1, y_2, y_3, y_4 . En la Tabla 3 se pueden observar los parámetros utilizados por el sistema CPG R4A3 para generar las 4 señales acopladas.

Tabla 3: Parámetros utilizados en el Sistema R4A3.

PARAMETROS
A=2.9415
B=5.3063
b=8.3242
C=5.9749
D=3.3531
K1=2.9923
K2=4.5259
tao=4.2265
tao2=3.5961
tao3=5.5832
tao4=7.4255

Figura 11: Respuesta y_1 , y_2 , y_3 , y_4 : Movimiento oscilatorio de la red neuronal recurrente.



7. ALGORITMO MULTIDINÁMICAS PARA OPTIMIZACIÓN GLOBAL (MAGO)

Dado que el grado de libertad del sistema de ecuaciones del oscilador CPG no corresponde para una solución analítica, se debe recurrir a un método alternativo para estimar sus parámetros. Se decidió en esta tesis aplicar un algoritmo evolutivo por su potencial para solucionar problemas no lineales. En este caso se seleccionó el algoritmo MAGO (algoritmo multidinámicas para optimización global, MAGO, por su acrónimo en inglés Mutidynamics Algorithm for Global Optimization) [31].

El algoritmo multidinámicas para optimización global (MAGO) está inspirado en Algoritmos de Estimación de la Distribución, Control Estadístico de Calidad y optimización sin derivadas no restringida multidimensional [32]. Como la mayoría de algoritmos evolutivos, MAGO inicia con una población inicial aleatoria sobre el espacio de búsqueda limitado por el problema. Para las siguientes iteraciones se crean nuevos individuos por medio de tres subgrupos. Cada subgrupo tiene su propia dinámica de evolución, independiente de los otros subgrupos.

Dinámica Emergente. Este subconjunto se basa en la selección de los individuos que han obtenido los mejores valores en su función objetivo, mutándolos aplicando el método Nelder-Mead de derivación numérica [33] y de acuerdo con el nuevo desempeño, decidir si sobrevive el padre o el hijo (el mutante).

Se crea un individuo de prueba a partir del mejor de todos los individuos y un individuo de los actuales mejores seleccionados, siguiendo la regla en la ecuación (5):

$$x_T^{(j)} = x_m^{(j)} + F^{(j)} \times (x_B^{(j)} - x_m^{(j)}) \quad (5)$$

Donde $x_B^{(j)}$ es el mejor individuo de la generación j y $x_m^{(j)}$ es el individuo seleccionado. $F^{(j)}$, ecuación (6), es un coeficiente dependiente de la matriz de covarianzas de la población actual que incluye información sobre la dependencia de las variables del problema.

$$F^{(j)} = \frac{S^{(j)}}{\|S^{(j)}\|} \quad (6)$$

Donde $S^{(j)}$ es la matriz de covarianza muestral de la población de individuos en la generación j .

Dinámica de Multitudes: Este subgrupo tiene el rol de explorar el espacio de búsqueda alrededor de la media poblacional. Si la media de la población y la matriz de dispersión para la generación j son $x_M^{(j)}$ y $S^{(j)}$, entonces la siguiente generación de la Dinámica de Multitudes es creada desde la distribución uniforme en el hyper-

rectángulo $[LB^{(j)}, UB^{(j)}]$, donde (7) y (8) son vectores con la diagonal de la matriz de dispersión poblacional de la generación j , descrita por la ecuación (9).

$$LB^{(j)} = x_M^{(j)} - \sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \quad (7)$$

$$UB^{(j)} = x_M^{(j)} + \sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \quad (8)$$

$$S^{(j)} \text{diag}(S^{(j)}) = \begin{bmatrix} S_{11}^{(j)} & S_{22}^{(j)} & \dots & S_m^{(j)} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

Dinámica Accidental: Las dos dinámicas mencionadas anteriormente concentran la población alrededor de óptimos locales, el mejor actual de todos y la media poblacional. Por este motivo MAGO introduce nuevos individuos en cada generación. Estos individuos son creados por muestreo de una distribución uniforme en todo el espacio de búsqueda. Esta dinámica también mantiene la estabilidad numérica de la matriz de dispersión de covarianza.

Cardinalidades: Para las tablas de control estadístico se supone que si el proceso está fuera de los límites de control entonces se sospecha que el proceso está fuera de orden. Un paso en el MAGO es un tipo de descomposición de la varianza, inspirado en el conocido análisis de varianza (ANOVA).

Considerar la matriz de dispersión poblacional de la generación j , $S^{(j)}$ y su diagonal. Si $Pob^{(j)}$ es el conjunto de las posibles soluciones en la generación j , entonces se pueden definir los siguientes grupos, ecuaciones (10), (11) y (12).

$$G_1 = \left\{ \mathbf{x} \in Pob^{(j)} / x_M^{(j)} - \sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \leq \mathbf{x} \leq x_M^{(j)} + \sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \right\} \quad (10)$$

$$G_2 = \left\{ \mathbf{x} \in Pob^{(j)} / x_M^{(j)} - 2\sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \leq \mathbf{x} \leq x_M^{(j)} + \sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \right\} \quad (11)$$

$$G_3 = \left\{ \mathbf{x} \in Pob^{(j)} / x \leq x_M^{(j)} - 2\sqrt{\text{diag}(S^{(j)})}; \mathbf{x} \geq x_M^{(j)} + 2\sqrt{\text{diag}(S^{(j)})} \right\} \quad (12)$$

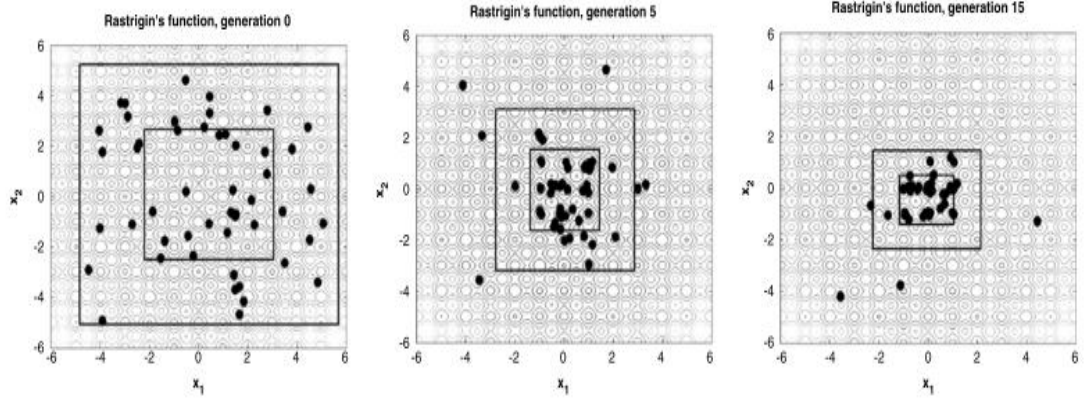
Las desigualdades pueden entenderse en la siguiente forma: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ y $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, entonces $\mathbf{x} < \mathbf{y}$ si y solo si $x_i < y_i$ para $i = 1, 2, \dots, n$. La misma forma para \leq, \geq e $>$. [31]

Para los grupos G_1, G_2 y G_3 las cardinalidades son N_1, N_2 y N_3 respectivamente. [31].

En la

se puede observar un ejemplo de la evolución del algoritmo MAGO para encontrar una solución.

Figura 12: (a) Generación 0 (b) Generación 5 (c) Generación 15 [31].



8. SEÑALES BIOINSPIRADAS

El análisis de la locomoción de un caballo en modo caminata se realizó a partir de una imagen desarrollada por Muybridge [4]. En la Figura 13 se pueden observar ocho posiciones distintas de un equino, cada una de ellas describe un determinado ángulo para las articulaciones de las patas delanteras y traseras. Las articulaciones de la patas delanteras y traseras tienen la siguiente nomenclatura:

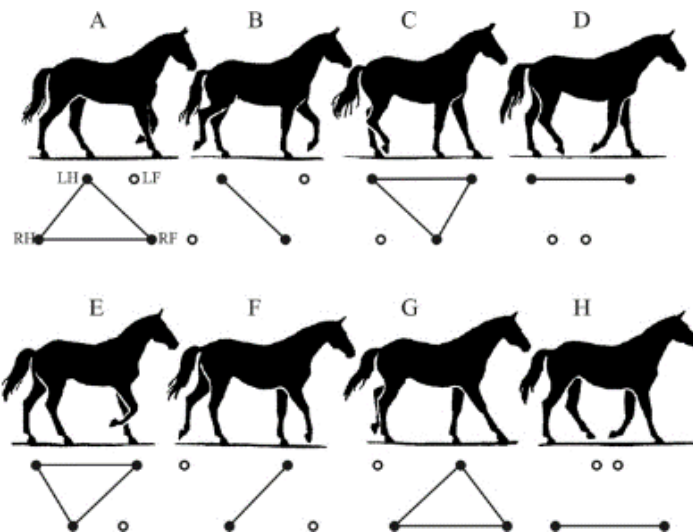
Patatas delanteras:

- Superior derecha (DD1), media derecha (DD2) e inferior derecha (DD3).
- Superior izquierda (DI1), media izquierda (DI2) e inferior izquierda (DI3).

Patatas traseras

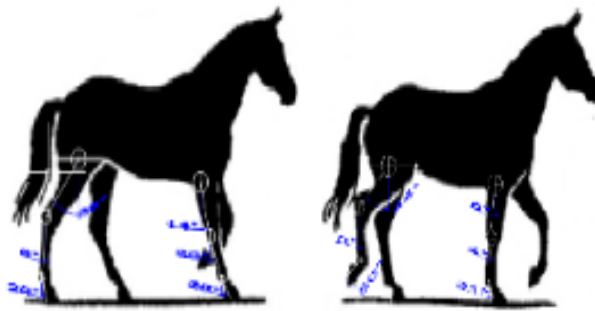
- Superior derecha (TD1), media derecha (TD2) e inferior derecha (TD3).
- Superior izquierda (TI1), media izquierda (TI2) e inferior izquierda (TI3).

Figura 13: Posiciones en locomoción de un equino [4].



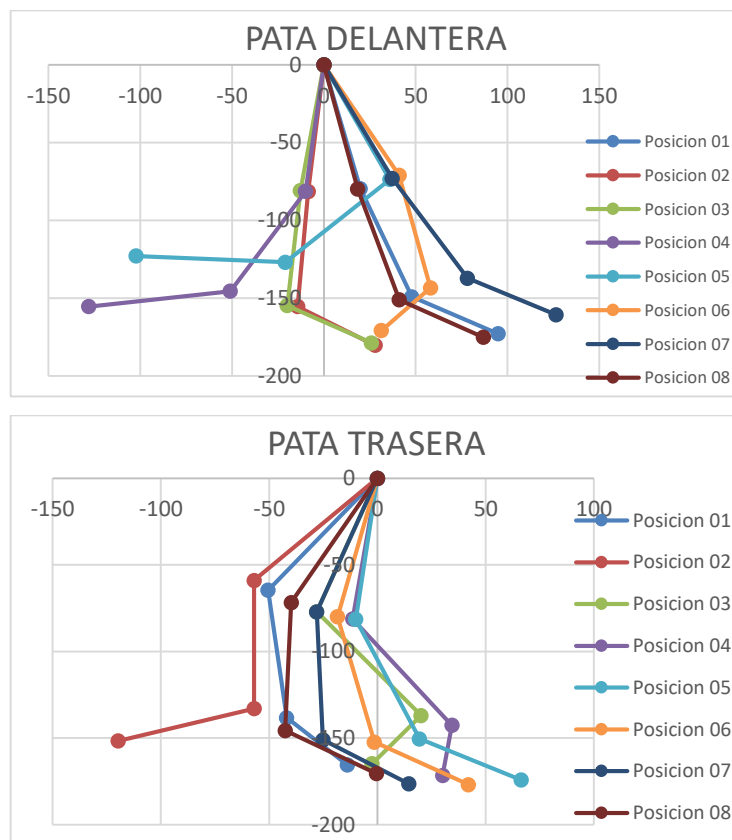
En la Figura 14 se pueden observar dos posiciones de la Figura 13 en las cuales se distinguen los distintos ángulos que obtienen las articulaciones de las patas delantera y trasera en modo caminata. Estos datos serán utilizados posteriormente para generar una señal en el tiempo que represente el comportamiento para las 3 articulaciones de cada una de las patas realizando la locomoción.

Figura 14: Medición de ángulos en las articulaciones de un equino.



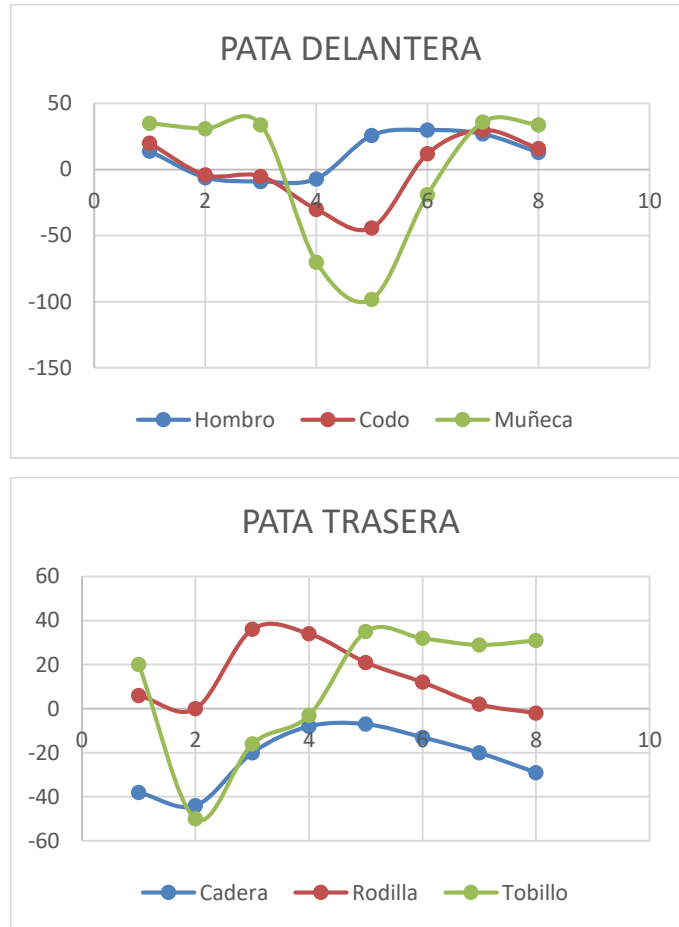
En la Figura 15 se encuentran representadas mediante vectores las ocho posiciones que adquieren las articulaciones de la Figura 14, para las patas delantera y trasera de un equino.

Figura 15: Posiciones del equino mediante vectores.



La variación angular en el tiempo de las articulaciones de cada una de las patas del equino durante la locomoción, en modo caminata, se pueden observar en la Figura 16.

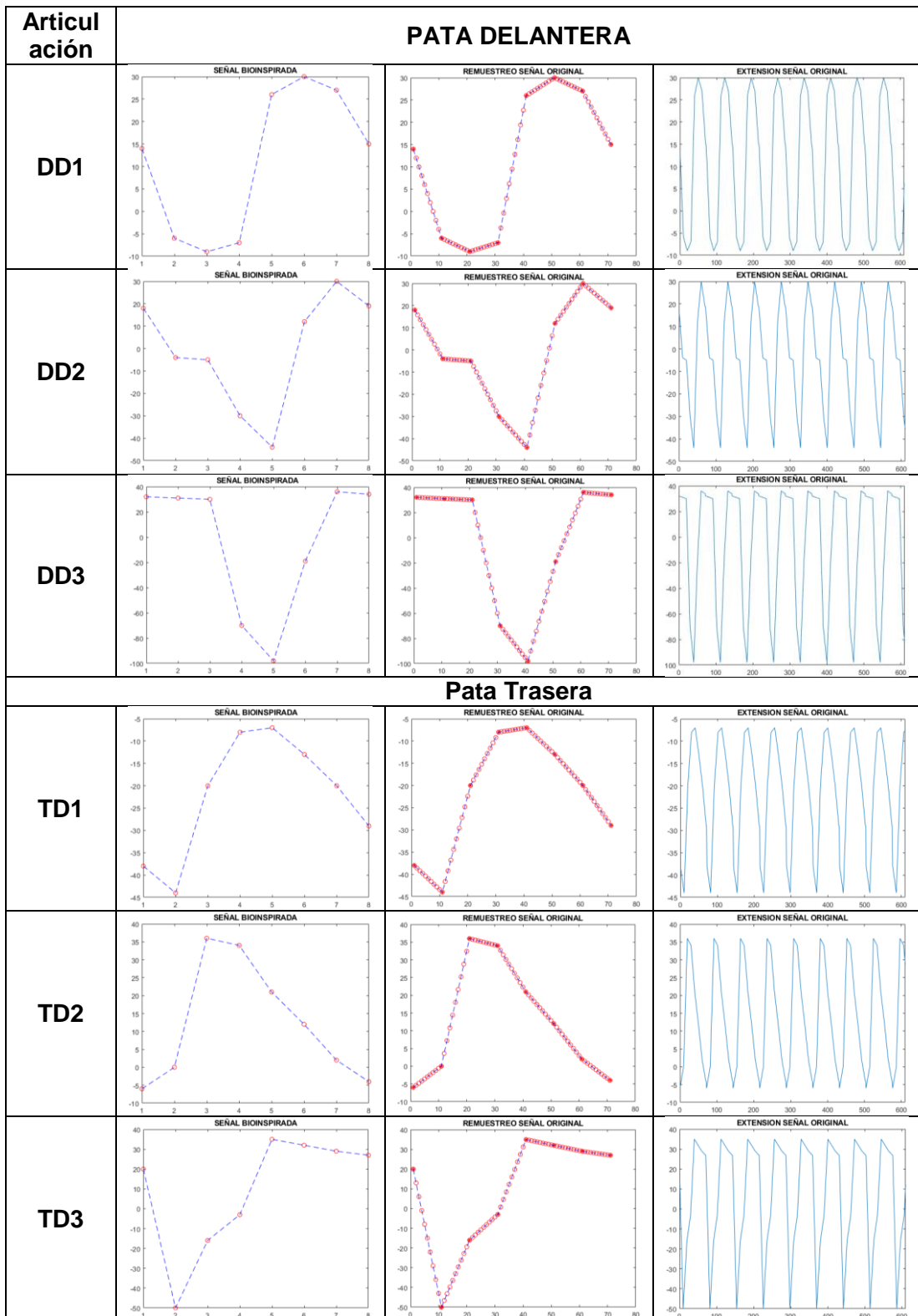
Figura 16: Variación de ángulos en el tiempo.



8.1 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Las señales originales bioinspiradas en la locomoción de un equino en modo caminata constan de 8 muestras por cada ciclo de paso, estas señales fueron remuestreadas para obtener una señal de 80 muestras, es decir, mediante interpolación lineal se incluyeron 72 muestras entre los valores ya existentes de las señales bioinspiradas, además se aplicó una extensión de 7 ciclos de paso para cada una de las señales originales, estos procesos los podemos encontrar en la Tabla 4.

Tabla 4: Remuestreo y extensión de señales originales bioinspiradas en la locomoción de un equino.



8.2 MODELO HEURÍSTICO DE ESTIMACION EVOLUTIVA

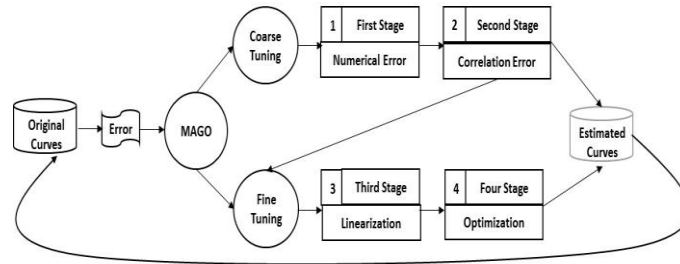
El estimador evolutivo desarrollado para reproducir las señales bioinspiradas consta de dos procesos llamados:

- Ajuste Grueso
- Ajuste Fino

En el ajuste grueso se realiza una primera aproximación al resultado minimizando el error entre la señal bioinspirada y la señal oscilatoria. La señal oscilatoria es una de las salidas del sistema CPG R4A3 descrito por las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). El primer error que se utiliza en esta etapa se basa en la relación numérica entre las amplitudes de las dos señales. El segundo error utilizado en el ajuste grueso se basa en la correlación lineal entre las señales, permitiendo mejorar su frecuencia.

El ajuste fino se encarga de mejorar la respuesta del sistema mediante un error que abarca la amplitud y la frecuencia entre las señales. En la Figura 17 se puede observar el proceso de estimación de las 11 constantes del oscilador acoplado R4A3 para reproducir las señales bioinspiradas.

Figura 17: Modelo Heurístico de Estimación Evolutiva de Parámetros [5].



8.2.1 Ajuste grueso

Durante el ajuste grueso el modelo heurístico de estimación evolutiva minimiza el error de amplitud y de frecuencia entre las señales bioinspiradas y los osciladores acoplados.

Primera Etapa.

Se han ensayado las funciones objetivo (13), (14) y (15) para obtener un error numérico que permita realizar un ajuste en amplitud de las señales.

$$e_N = \sum y(i) - sy(i) \quad (13)$$

$$e_N = \sum (y(i) - sy(i))^2 \quad (14)$$

$$e_N = \sum |y(i) - sy(i)| \quad (15)$$

La función objetivo, seleccionada y con mejores resultados para esta etapa, está definida por el cálculo de un error numérico (e_N) mediante la ecuación (16).

$$e_N = \sum |y(i) - sy(i)| \quad (16)$$

Donde y es la señal deseada, sy es una de las salidas del sistema CPG, n es la cantidad de puntos de las señales e $i = 1, 2, \dots, n$.

Segunda Etapa.

El valor de correlación lineal nos permite forzar las salidas del sistema CPG para obtener una relación lineal punto a punto entre las señales, es decir, mediante la utilización de la correlación podemos ajustar la frecuencia de las señales. La función utilizada es $corr()$ del software MATLAB y la ecuación del error utilizada es (17).

$$e_c = 1 - (corr(y, sy))^2 \quad (17)$$

Los valores de la función $corr()$ van desde $[-1, 1]$, donde 0 significa que no existe correlación lineal entre las señales, 1 las señales tienen una relación lineal positiva y -1 relación lineal es negativa.

8.2.2 Ajuste Fino

El ajuste fino es el encargado de minimizar aún más el error en amplitud resultante del ajuste grueso, para lo cual se requiere de las siguientes etapas.

Tercera Etapa.

Cuando se terminan las dos primeras etapas del estimador evolutivo (ajuste grueso) se tiene un valor de correlación lineal entre las señales, mayor o igual a 0.6. Entonces se procede a aplicar las dos etapas de ajuste fino con la ecuación (18) para minimizar el error [34].

$$Y = A + B(SY) \quad (18)$$

Donde A y B son constantes aditivas y multiplicativas. La señal Y es aquella que se desea emular y SY es la salida del sistema CPG con los 11 parámetros estimados previamente. Para determinar los valores de A y B se utilizan las ecuaciones (19) y (20) respectivamente.

$$\begin{aligned} \sum sy_i &= \bar{sy} \\ \sum y_i &= \bar{y} \\ \sum sy_i^2 &= S_{SY}^2 \end{aligned}$$

$$\sum y_i^2 = S_Y^2$$

$$\sum sy_i y_i = S_{SY}$$

$$A = \bar{y} - B\bar{s}_y \quad (19)$$

$$B = \frac{S_{SY}}{S_{S_y}^2} \quad (20)$$

Cuarta Etapa.

En esta etapa se optimizan los valores de las constantes A y B de la ecuación (18) mediante la función objetivo mostrado en (21). Para esto se utiliza la ecuación (16).

$$Y = A1 + B1 * (A + B(SY))$$

$$Y = A1 + (A * B1) + (B * B1) * (SY)$$

$$Y = AT + BT(SY) \quad (21)$$

Donde A1 y B1 son las nuevas constantes encontradas por el algoritmo MAGO y la ecuación original (18) no ha sido modificada, manteniendo de esta manera la condición de correlación lineal.

8.3 PARAMETROS SISTEMA CPG R4A3

El estimador evolutivo ha sido capaz de reproducir las señales bioinspiradas en la locomoción de un equino en modo caminata con una correlación lineal promedio del 70%. En la Tabla 5 se pueden observar las salidas s_y del sistema CPG R4A3, los 11 parámetros obtenidos por el estimador evolutivo y también las constantes AT y BT.

Tabla 5: Parámetros de locomoción modo caminata del robot R4A3.

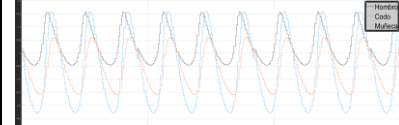
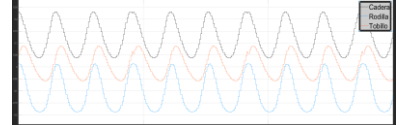
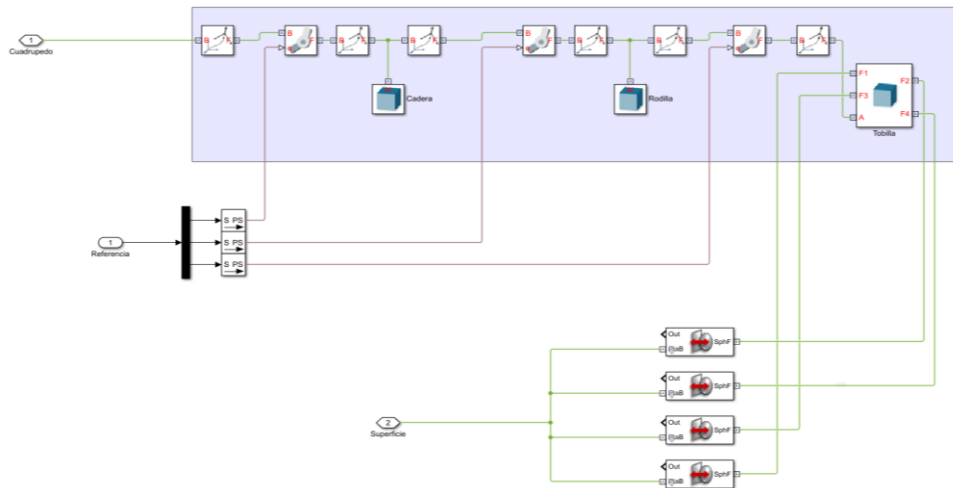
PARÁMETROS PATA DELANTERA	PARÁMETROS PATA TRASERA
A = 2.338	A = -1.6127
B = 5.3211	B = 2.4768
b = 6.6669	b = -0.959
C = 7.0931	C = 1.1199
D = 3.6371	D = 1.13
K1 = 6.9576	K1 = 2.4038
K2 = 8.8432	K2 = -0.2709
tao = 1.8561	tao = 5.7124
tao2 = 3.8428	tao2 = 1.6391
tao3 = 7.3332	tao3 = 6.2812
tao4 = 8.2887	tao4 = 1.8459
AT = [-21 -80.566 -127.2852]	AT = [3.7 37 53]
BT = [-5 1.3408 0.3689]	BT = [9.3 6.6 -4.8]
	

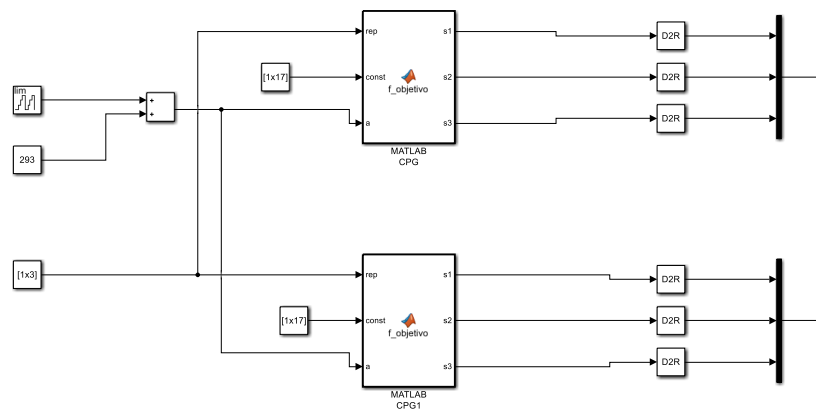
Figura 19: Configuración de una pata bajo condiciones físicas reales.



9.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CPG

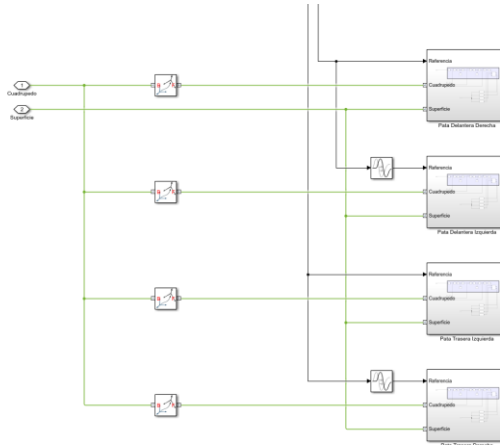
La Figura 20 muestra la implementación de dos sistemas CPG, el primer sistema contiene los parámetros para emular las señales de las articulaciones de la pata delantera y el segundo sistema CPG contiene los parámetros para emular el comportamiento de las articulaciones de la pata trasera. Estos dos sistemas CPG en sincronía son capaces de emular la locomoción de un equino en modo caminata.

Figura 20: Implementación del Sistema CPG para locomoción en modo caminata.



Las patas del cuadrúpedo tienen la misma estructura física y por lo tanto se debe modificar únicamente la primera articulación rotativa que une el cuerpo del robot con cada una de las 4 patas, se incluye una función de retardo para sincronizar la caminata de robot R4A3 como se muestra en la Figura 21.

Figura 21: Sistema CPG y robot R4A3.



La programación utilizada para los osciladores acoplados CPG se puede visualizar en la Tabla 6, donde:

- $s1, s2, s3$ son las señales de salida para las 3 articulaciones de cada una de las patas delantera y trasera.
- El vector *constantes* contiene cada uno de los 11 parámetros requeridos para que el oscilador sea capaz de reproducir el comportamiento de las articulaciones de las patas del cuadrúpedo.
- El vector *amplitud* es el encargado de manipular las señales $s1, s2, s3$ para sintonizar la locomoción en modo caminata del cuadrúpedo.
- La variable *indice* selecciona cada uno de los valores de las señales de respuesta $s1, s2, s3$ y los envía hacia los motores con una velocidad determinada.
- Y las ecuaciones matemáticas son las desarrolladas en [35].

Tabla 6: Programación de un oscilador acoplado CPG.

PROGRAMACIÓN DEL CPG
<pre>function [s1,s2,s3] = CPG(amplitud, constantes, indice) w=zeros(3,1); z=zeros(3,1); A=constantes(1); B=constantes(2); b=constantes(3); C=constantes(4); D=constantes(5); K1=constantes(6); K2=constantes(7); tao=constantes(8); tao2=constantes(9); tao3=constantes(10);</pre>

```

tao4=constantes(11);

w(1)=constantes(12);
w(2)=constantes(13);
w(3)=constantes(14);

z(1)=constantes(15);
z(2)=constantes(16);
z(3)=constantes(17);
npoints = 610;
dt = 1;
y1 = zeros(npoints,1);
y2 = zeros(npoints,1);
y3 = zeros(npoints,1);
y4 = zeros(npoints,1);
y5 = zeros(npoints,1);
t = zeros(npoints,1);

for step=1:609
r=A*(K1-D*y2(step))*(K1-D*y2(step))*(K1-D*y2(step))*dt;

m=tao*(B+b*y3(step))*(B+b*y3(step));
n=tao*(K1-D*y2(step))*(K1-D*y2(step));

y1(step+1) = y1(step)-((y1(step)*dt)/tao)+((r)/(n+ m));

r=A*(K2-D*y1(step))*(K2-D*y1(step))*(K2-D*y1(step))*dt;
m=tao2*(B+b*y4(step))*(B+b*y4(step));
n=tao2*(K2-D*y1(step))*(K2-D*y1(step));

y2(step+1) = y2(step)-((y2(step)*dt)/tao2)+((r)/(m+n));

y3(step+1) = y3(step)-((y3(step)*dt)/tao3)+((C*y1(step)*y1(step)*dt)/tao3);

r=A*(K2-D*y2(step))*(K2-D*y2(step))*dt;
m=tao4*(B+b*y5(step))*(B+b*y5(step));
n=tao4*(K2-D*y2(step))*(K2-D*y2(step));

y4(step+1) = y4(step)-((y4(step)*dt)/tao4)+((r)/(m+n));

y5(step+1) = y5(step)-((y5(step)*dt)/tao4) + ((C*y4(step)*y4(step)*dt)/tao4);
t(step+1) = t(step) + dt ;
end
s1=amplitud(1).*(w(1)+y1(indice).*z(1));
s2=amplitud(2).*(w(2)+y2(indice).*z(2));
s3=amplitud(3).*(w(3)+y3(indice).*z(3));
end

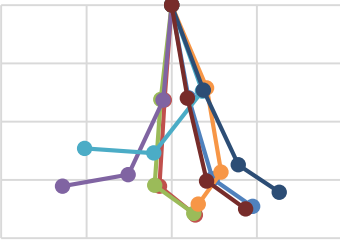
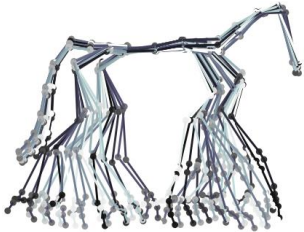
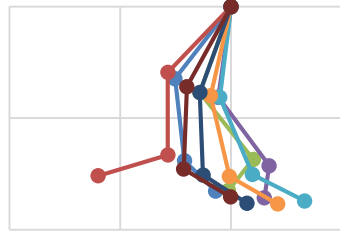
```

10. SIMULACION ROBOT R4A3

Existen varios métodos para realizar locomoción en robots cuadrúpedos articulados, los mismos que están descritos en el artículo de [36]. Uno de los métodos más utilizado es el basado en primitivas de movimiento cinemático (KMP), este método utiliza la cinemática para calcular la relación angular existente entre las articulaciones y los eslabones que componen las extremidades de un equino y de esta manera enviar estas señales a un robot cuadrúpedo.

En la Tabla 7 se puede observar dos métodos utilizados para obtener las señales de variación angular de las articulaciones durante la locomoción en modo caminata. El método cinemático o tradicional toma en cuenta las longitudes de los eslabones, variación angular de las articulaciones, relación posicional entre articulaciones, restricciones de movimiento y un punto fijo para el análisis. En la actualidad la mayoría de estos procesos se realizan con sensores y visión artificial generando un costo elevado para la adquisición de estas bases de datos.

Tabla 7: Posiciones angulares de las extremidades de un equino en modo caminata.

Algoritmo Heurístico	Cinemática
<p data-bbox="603 1055 778 1077">PATA DELANTERA</p> 	
<p data-bbox="619 1346 762 1368">PATA TRASERA</p> 	

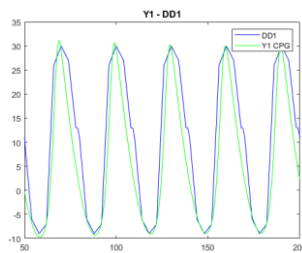
El método propuesto en este caso de estudio nos permite analizar la locomoción de un equino en modo caminata a partir de una serie de imágenes y obtener posiciones angulares similares a las del método cinemático, con la diferencia que no generan un costo computacional elevado, el tiempo de elaboración y la complejidad se reducen.

El sistema de ecuaciones diferenciales (1), (2), (3) y (4) basado en redes neuronales recurrentes es el encargado de generar los CPG y mediante el estimador evolutivo de la

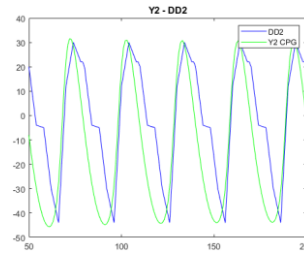
Figura 17 se sintonizan los 11 parámetros del sistema oscilatorio obteniendo una correlación lineal promedio del 70% entre las señales originales de locomoción y los CPG. En la

Figura 22 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar las señales bioinspiradas de las articulaciones DD1, DD2, DD3 de la pata delantera derecha y las salidas del sistema CPG Y1, Y2, Y3 que emulan su comportamiento y en la Figura 23 se muestran las señales de las articulaciones TD1, TD2, TD3 de la pata trasera derecha y las salidas Y1, Y2, Y3 del segundo sistema CPG.

Figura 22: a) Y1 – DD1



b) Y2 – DD2



c) Y3 – DD3

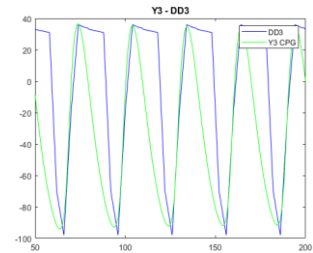
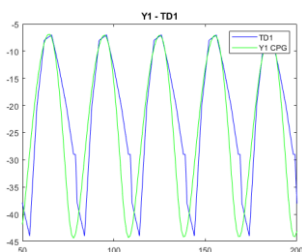
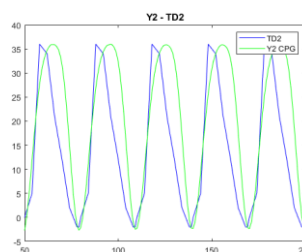


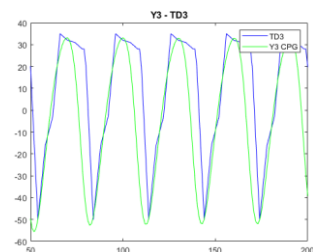
Figura 23: a) Y1 – TD1



b) Y2 – TD2

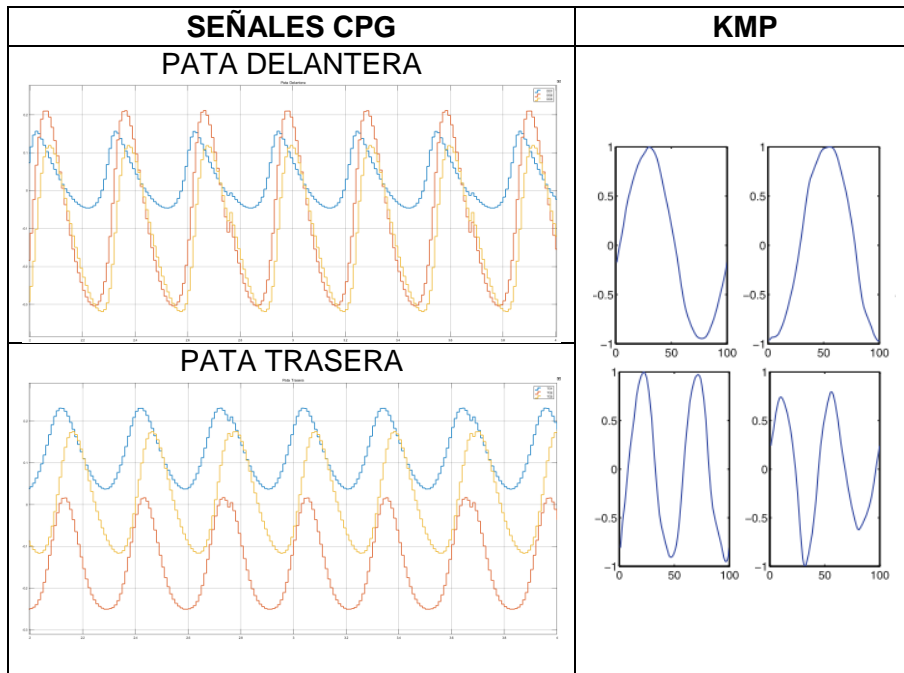


c) Y3 – TD3



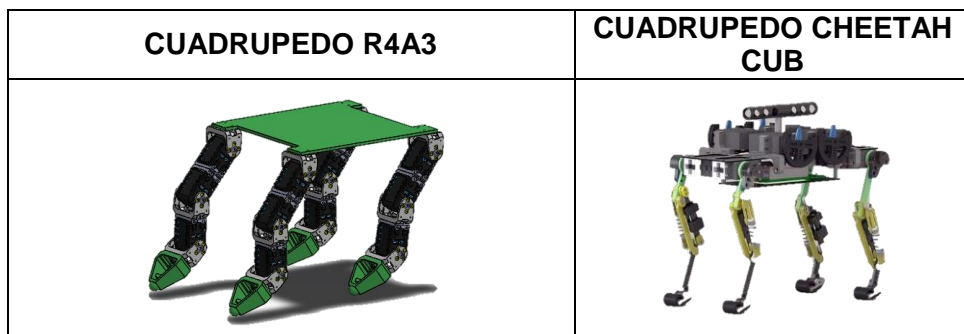
La Tabla 8 muestra la emulación mediante osciladores acoplados CPG y mediante KMP de las señales de variación angular obtenidas en la Tabla 7 para que un robot cuadrúpedo articulado sea capaz de realizar locomoción en modo caminata.

Tabla 8: Modelo de osciladores acoplados basado en CPG y KMP.



Los modelos 3D para la simulación de los sistemas de locomoción basado en CPG y en KMP se encuentran en la Tabla 9. El cheetah cub es un robot cuadrúpedo desarrollado por la empresa Biorobotics Laboratory, [37], y el cuadrúpedo R4A3 fue desarrollado para este caso de estudio, utilizando servomotores digitales de alta precisión y como material base el PLA que es un termoplástico biodegradable utilizado en la impresión 3D.

Tabla 9: Diseños 3D del cuadrúpedo R4A3 y el Cheetah Cub.



10.1 PRUEBAS DE SIMULACION

Un robot cuadrúpedo articulado es capaz de realizar locomoción en modo caminata siempre y cuando se encuentren sincronizados los movimientos de las patas delanteras derecha e izquierda con las patas traseras derecha e izquierda, para lograr esta sincronización se aplicó un retardo en milisegundos al inicio de los CPG, es decir, si la caminata inicia con la pata delantera derecha se debe retardar la pata delantera izquierda y de la misma forma con las patas traseras, el tiempo de retardo se calcula de la siguiente forma:

$$frecuencia\ de\ paso = 0.66\ Hz$$

$$muestras\ de\ paso = 30\ muestras$$

$$tiempo\ de\ muestreo = \frac{1}{muestras\ de\ paso * frecuencia\ de\ paso(Hz)}$$

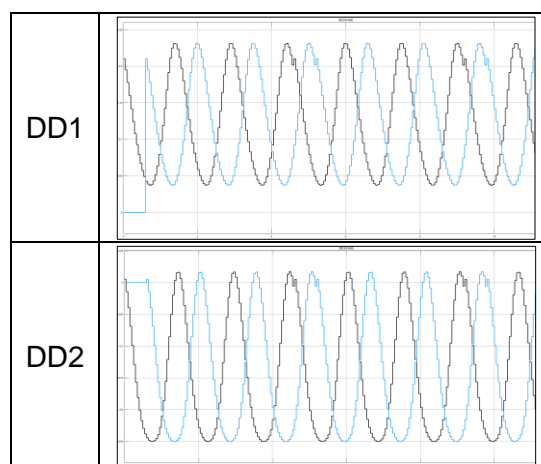
$$tiempo\ de\ muestreo = \frac{1}{30 * 0.66} = 0.05seg$$

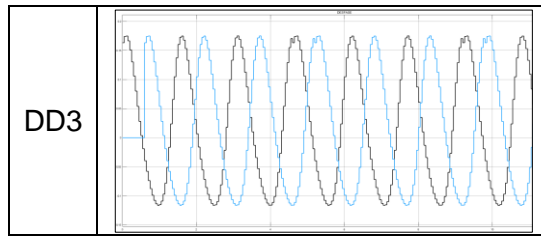
$$retardo\ teorico\ (seg) = \frac{muestras\ de\ paso}{2} * tiempo\ de\ muestreo(seg)$$

$$retardo\ teorico = \frac{30}{2} * 0.05 = 0.75s$$

El retardo inicial entre las señales CPG genera un desfase constante a lo largo del tiempo entre los CPG de las 4 patas del robot R4A3, este retardo y desfase en el tiempo se pueden visualizar en la Tabla 10.

Tabla 10: Retardo práctico aplicado a las señales de las articulaciones DD1, DD2 Y DD3.





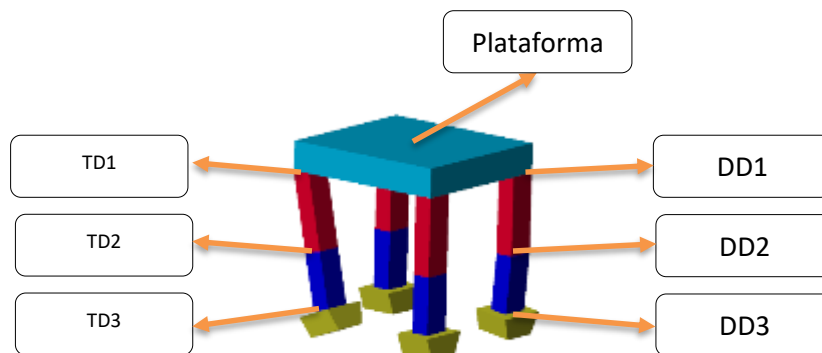
Las simulaciones fueron realizadas utilizando el software Matlab y la herramienta para simulación de sistemas robóticos Simscape. En la Tabla 11 se encuentran especificadas las dimensiones de los eslabones que unen las articulaciones de las patas con la plataforma del robot R4A3, cabe recalcar que para la simulación también se incluyeron parámetros como: la densidad de material y el módulo de Young del PLA.

Tabla 11: Dimensiones del Cuadrúpedo R4A3 en SIMSCAPE.

PLATAFORMA	ESLABÓN 1	ESLABÓN 2	ESLABÓN 3
$x = 25 \text{ cm}$	$x = 2.5 \text{ cm}$	$x = 2.5 \text{ cm}$	$x = 7 \text{ cm}$
$y = 25 \text{ cm}$	$y = 3.8 \text{ cm}$	$y = 3.8 \text{ cm}$	$y = 3 \text{ cm}$
$z = 4 \text{ cm}$	$z = 10.6 \text{ cm}$	$z = 5 \text{ cm}$	$z = 5 \text{ cm}$

En la Figura 24 se puede observar la estructura del robot R4A3, para este diseño se utilizaron figuras básicas como cubos, rectángulos y trapecios con el fin de facilitar los cálculos y reducir el costo computacional para la simulación 3D del comportamiento del robot con las señales del sistema CPG de locomoción.

Figura 24: Robot R4A3 en SIMSCAPE.

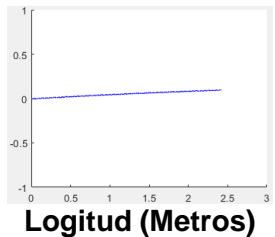
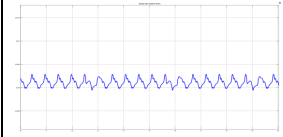
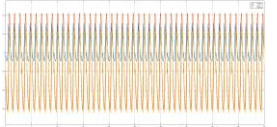
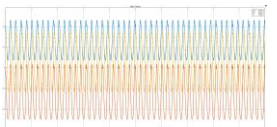


La frecuencia de paso para locomoción de un equino en modo caminata es de aproximadamente 0.97HZ, [36]. Esta frecuencia se probó en el cuadrúpedo R4A3 obteniendo los resultados mostrados en la

Tabla 12, las condiciones de simulación se encuentran descritas en la primera columna de la tabla. En la segunda columna se muestra la trayectoria de desplazamiento del robot R4A3 sobre una superficie plana visto desde un plano superior.

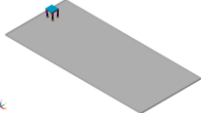
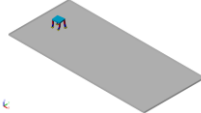

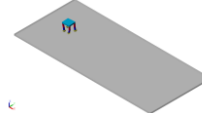

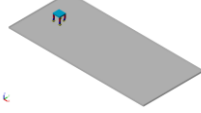


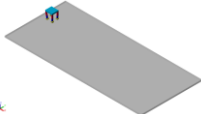
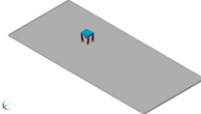
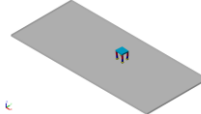
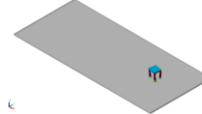
La plataforma del robot R4A3 presenta una variabilidad en su altura al realizar locomoción como se muestra en la tercera columna y en la cuarta columna de la tabla se muestran las señales CPG utilizadas para que el cuadrúpedo realice locomoción.

Tabla 12: R4A3 en locomoción con una frecuencia de paso de 0.97Hz.

CONDICIONES	VISTA SUPERIOR DESPLAZAMIENTO DEL R4A3	VARIABILIDAD PLATAFORMA R4A3	SEÑALES CPG
$f_{paso} = 0.97Hz$ Retardo = 510ms Tiempo = 50s	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	Pata Delantera  Pata Trasera 

Se aplicaron 3 frecuencias de paso para el robot R4A3 con el respectivo cálculo de retardo en las señales y los resultados se encuentran en la Tabla 13.

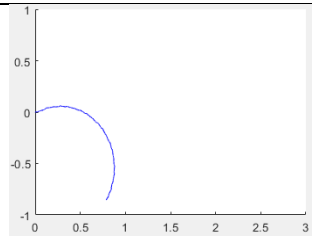
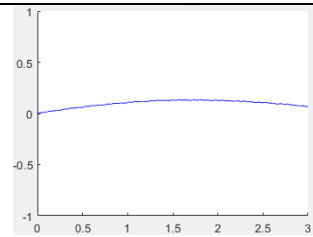
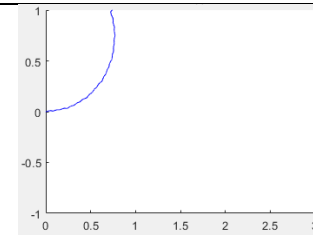
Tabla 13: Robot R4A3 en locomoción modo caminata y distintas frecuencias de paso.

<i>Tiempo = 0s</i>	<i>Tiempo = 4s</i>	<i>Tiempo = 8s</i>	<i>Tiempo = 12s</i>
<i>Caminata a 0.66Hz; retardo práctico = 600ms</i>			
			
<i>Caminata a 1.11 Hz; retardo práctico = 350ms</i>			
			
<i>Caminata a 3.25Hz; retardo práctico = 154ms</i>			
			

Mediante la manipulación del retardo inicial en las señales de los CPG para cada una de las 4 patas se pueden modificar las trayectorias de desplazamiento del robot R4A3 sobre un terreno plano. En la Tabla 14 se puede observar claramente la relación existente y los rangos de tiempo que se pueden asignar al retardo de señales para variar el desplazamiento del cuadrúpedo articulado.

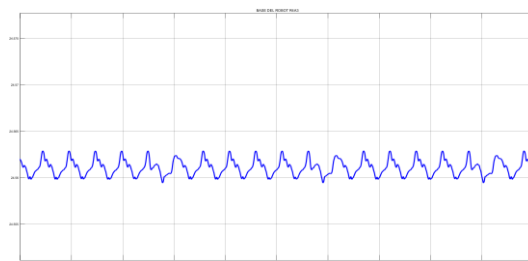
- $154ms < Retardo \leq 180ms$, el cuadrúpedo describe una trayectoria hacia la derecha.
- $Retardo = 154ms$, el cuadrúpedo mantiene una trayectoria en línea ligeramente recta.
- $140ms \leq Retardo < 154ms$, el cuadrúpedo describe una trayectoria hacia la izquierda.

Tabla 14: Vista superior de la trayectoria de desplazamiento del robot R4A3 sobre una superficie plana.

<i>Caminata a 3.25Hz</i> $154ms < Retardo \leq 180ms$	<i>Caminata a 3.25Hz</i> $Retardo = 154ms$	<i>Caminata a 3.25Hz</i> $140ms \leq Retardo < 154ms$
 Logitud (Metros)	 Logitud (Metros)	 Logitud (Metros)

La variabilidad de la plataforma del robot R4A3 mientras se desliza realizando locomoción en modo caminata tiene una amplitud aproximada de $5mm$ como se muestra en la Figura 25.

Figura 25: Variabilidad de la plataforma del cuadrúpedo R4A3 en locomoción a una frecuencia de paso de $0.97Hz$.

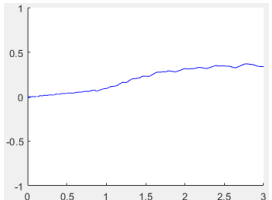
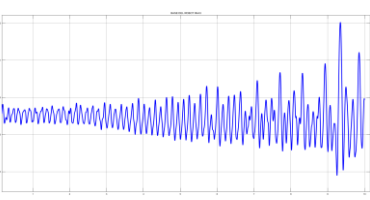
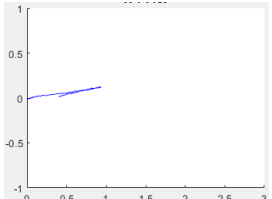
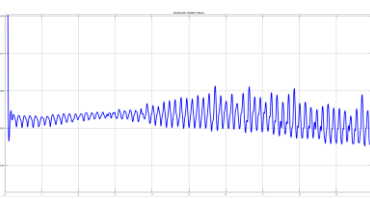
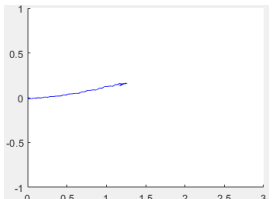
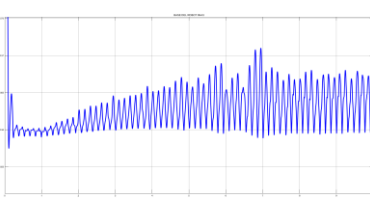


11. ANALISIS COMPARATIVO

La Tabla 15 muestra el movimiento de la plataforma del robot R4A3 debido a una variación en las señales CPG que componen el sistema de locomoción en modo caminata.

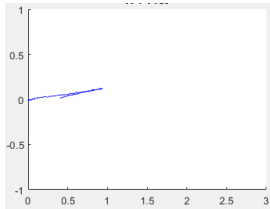
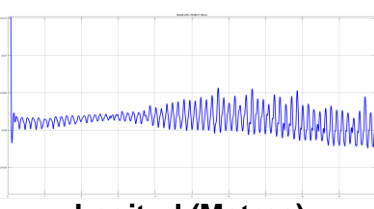
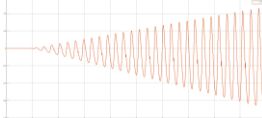
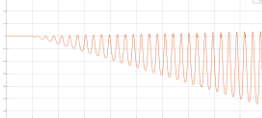
Se mantuvieron constantes las amplitudes de dos señales CPG y se manipuló la tercera señal con una variación tipo rampa que va desde 0 hasta 1, la frecuencia de paso se mantuvo en 3.25Hz y el retardo de sincronización en 153.8ms parámetros que corresponden a una caminata ligeramente recta.

Tabla 15: Variación de amplitudes en las señales CPG a una frecuencia de paso de 3.25Hz.

	VISTA SUPERIOR DESPLAZAMIENTO DEL R4A3	VARIABILIDAD PLATAFORMA R4A3	SEÑALES CPG
DD1 Y TD1	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	ARTICULACIÓN DD1
			ARTICULACIÓN TD1
DD2 Y TD2	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	ARTICULACIÓN DD2
			ARTICULACIÓN TD2
DD3 Y TD3	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	ARTICULACIÓN DD3
			ARTICULACIÓN TD3

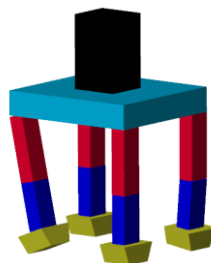
Durante este proceso de simulación se ha descubierto un comportamiento emergente por parte del robot R4A3. Este comportamiento consiste en la inversión de la dirección de desplazamiento, para lo cual, se debe mantener constante la amplitud de las señales de las articulaciones DD1, DD3, DI1 y DI3 de las patas delanteras y las TD1, TD3, TI1, TI3 de las patas traseras. La amplitud de las señales de las articulaciones DD2, DI2, TD2, y TI2 tienen una relación directa con la dirección de desplazamiento del robot. En la Tabla 16 se puede observar que cuando la amplitud de las señales DD2, DI2, TI2 y TD2 están al 0.5 el robot cambia su dirección de locomoción y comienza a retroceder, también podemos observar una disminución en la variabilidad de la plataforma del robot.

Tabla 16: Comportamiento emergente del robot R4A3.

VISTA SUPERIOR DESPLAZAMIENTO DEL R4A3	VARIABILIDAD PLATAFORMA R4A3	SEÑALES CPG
 <p data-bbox="379 1064 609 1099">Logitud (Metros)</p>	 <p data-bbox="778 1064 1016 1099">Logitud (Metros)</p>	<p data-bbox="1123 819 1385 855">ARTICULACIÓN DD2</p>  <p data-bbox="1123 981 1385 1016">ARTICULACIÓN TD2</p> 

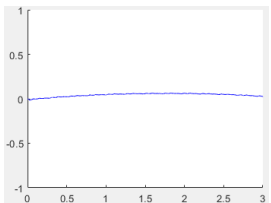
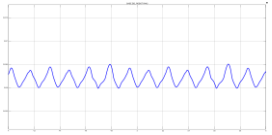
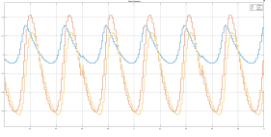
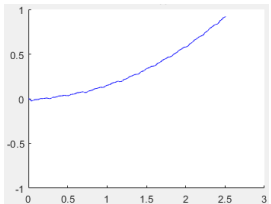
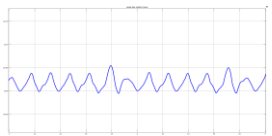
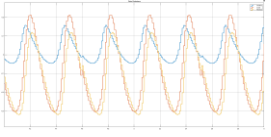
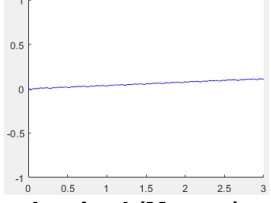
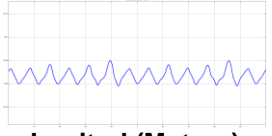
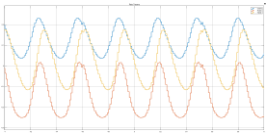
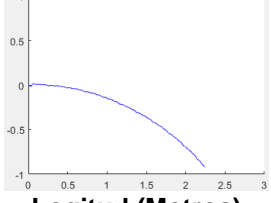
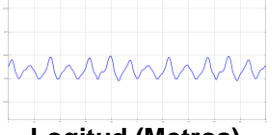
Una de las pruebas más concluyentes para determinar la robustez del sistema de locomoción desarrollado en esta tesis fue el de colocar un peso de 0.6Kg sobre el robot y aplicar las señales CPG para locomoción en modo caminata, la disposición del peso sobre el robot se observa en la Figura 26. Como era de esperar el R4A3 se desviaba de su trayectoria de acuerdo con el lugar de ubicación de la carga.

Figura 26: Robot R4A3 con un peso adicional de 0.6Kg sobre la plataforma.



En estas pruebas se utilizó la máxima frecuencia de paso de 3.25Hz y un retardo de sincronización entre las señales de 153.8ms con el objetivo que forzar al máximo la caminata y los resultados se pueden encontrar en la Tabla 17.

Tabla 17: Pruebas de funcionamiento con un peso adicional de 0.6Kg en distintas ubicaciones sobre el cuadrúpedo R4A3 a una frecuencia de paso de 3.25Hz.

CONDICIONES	VISTA SUPERIOR DESPLAZAMIENTO DEL R4A3	VARIABILIDAD PLATAFORMA R4A3	SEÑALES CPG
<p>SIN PESO <i>Peso = 0kg</i> <i>f_{paso} = 3.25Hz</i> <i>Retardo = 153.8ms</i></p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	<p>Pata Delantera</p> 
<p>PESO EN: CENTRO IZQUIERDA <i>Peso = 0.6kg</i> <i>f_{paso} = 3.25Hz</i> <i>Retardo = 153.8ms</i></p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	
<p>PESO EN: CENTRO DERECHA <i>Peso = 0.6kg</i> <i>f_{paso} = 3.25Hz</i> <i>Retardo = 153.8ms</i></p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	<p>Pata Trasera</p> 
<p>PESO EN: CENTRO DERECHA <i>Peso = 0.6kg</i> <i>f_{paso} = 3.25Hz</i> <i>Retardo = 154.8ms</i></p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	 <p>Logitud (Metros)</p>	

12. CONCLUSIONES

- Se comprobó que la bioinspiración o biomimética puede ser utilizada como fuente de inspiración para solucionar los problemas de locomoción en robots articulados. Para la robótica esto es importante dado que los seres vivos con locomoción articulada son capaces de desplazarse de un lugar a otro con el consumo mínimo de energía.
- Los animales terrestres tienen varios tipos de locomoción que pueden ser representados en tres grupos: caminata, trote y galope. El modelo heurístico de estimación de parámetros desarrollado en esta tesis fue capaz de emular las señales bioinspiradas en la locomoción en modo caminata de un equino con una correlación lineal del 70%, lo cual fue suficiente para que el cuadrúpedo articulado R4A3 sea capaz de realizar locomoción en modo: caminata lenta, caminata y caminata rápida con una frecuencia de paso de 0.66Hz, 0.97Hz y 3.25Hz, respectivamente, sin perder estabilidad.
- Cuando se mantiene constante la frecuencia de paso y se varía el tiempo de retardo en la sincronización del movimiento inicial de las patas se puede controlar la trayectoria de desplazamiento del robot R4A3, es decir, si a una frecuencia de paso de 3.25Hz se aplica un retardo entre 154ms y 180ms el robot gira hacia la derecha, con un retardo de 154ms el robot describe una trayectoria en línea recta y con un retardo entre 140ms y 154ms el robot gira hacia la izquierda.
- La variabilidad en la plataforma superior (representando el cuerpo del equino) del robot R4A3 para una frecuencia de 0.97hz es de aproximadamente 10mm. Esta variabilidad puede ser minimizada con la manipulación de la amplitud de la segunda articulación de las 4 patas. La primera y tercera articulación maximizan esta variabilidad volviendo inestable la locomoción del robot R4A3.
- Se descubrió que la emulación por CPG de la locomoción del cuadrúpedo permite el comportamiento emergente, esto es, que el robot cuadrúpedo R4A3 puede invertir la dirección de su caminata mediante la manipulación de la amplitud de los CPG que controlan el movimiento de las articulaciones de cada una de las patas del robot.
- Como trabajo futuro se propone incluir un sistema de cámaras sobre el robot R4A3 para que mediante visión artificial y un sistema de control en lazo cerrado el robot sea capaz de evadir obstáculos y pueda desplazarse cumpliendo trayectorias planificadas.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Hugo and B. Zambrano, "Generador de Patrones Centrales Reconfigurables para la Implementación Adaptativa de Patrones Rítmicos de Locomoción," *Cinvestav - Tamaulipas*, 2011. [Online]. Available: http://www.tamps.cinvestav.mx/~jhbarronz/seminarios/Seminario2011/presentacion_1.pdf. [Accessed: 12-Oct-2016].
- [2] M. M. Gor, P. M. Pathak, A. K. Samantaray, J.-M. Yang, and S. W. Kwak, "Control oriented model-based simulation and experimental studies on a compliant legged quadruped robot," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 72, pp. 217–234, Oct. 2015.
- [3] E. Rico, "Analysis and application of methods of displacement in articulated platforms based on cpg's (central pattern generator)," Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [4] E. Muybridge, *Horses and Other Animals in Motion: 45 Classic Photographic Sequences*. New York: Dover Publications, 1985.
- [5] S. F. Balarezo and J. A. Hernández, "Evolutionary Parameter Estimation of Coupled Non-linear Oscillators," Springer, Cham, 2017, pp. 457–471.
- [6] "Locomotion," *Online Etymology Dictionary*. [Online]. Available: <https://www.etymonline.com/word/locomotion>. [Accessed: 18-Jun-2019].
- [7] G. Zug, "Locomotion Behavior," *Encyclopedia Britannica*, 2000. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/topic/locomotion/Introduction>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [8] K. Hirst, "Bipedal Locomotion," *ThoughtCo*, 2018. [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/bipedal-locomotion-a-defining-trait-170232>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [9] J. Napier, "Bipedalism Locomotion," *Encyclopedia Britannica*, 2010. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/bipedalism>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [10] Robotic Industries Association, "A Visual History of Joseph Engelberger's Life," *Robotics*, 2012. [Online]. Available: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/timeline.cfm>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [11] R. Barrientos, J. Sotelo, R. García, R. Sánchez, and S. Ortigoza, "Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte," *POLIBITS J.*, pp. 12–17, 2007.
- [12] "Unimate - El primer robot industrial," *Robotics*, 2012. [Online]. Available: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [13] B. Malone, "George Devol: Una vida dedicada a la invención y robots.," *SPECTRUM IEEE*, 2011. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/george-devol-a-life-devoted-to-invention-and-robots>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [14] P. G. de Santos, E. Garcia, and J. Estremera, *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. Springer Science & Business Media, 2007.

- [15] J. Zhang, F. Gao, X. Han, X. Chen, and X. Han, "Trot Gait Design and CPG Method for a Quadruped Robot," *J. Bionic Eng.*, vol. 11, pp. 18–25, 2014.
- [16] G. Arca, *Somos Hijos de la Guerra*, Segunda. Reino Unido: Theoklesia, 2012.
- [17] Y. Li, B. Li, J. Ruan, and X. Rong, "Research of mammal bionic quadruped robots: A review," *IEEE Conf. Robot. Autom. Mechatronics, RAM - Proc.*, pp. 166–171, 2011.
- [18] Y. Sakakibara, K. Kan, Y. Hosoda, M. Hattori, and M. Fujie, "Foot trajectory for a quadruped walking machine," in *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*, 2002, pp. 315–322.
- [19] W. Knight, "De qué hablo cuando hablo de robots que corren - Technology Review," *MIT Technology Review*, 2014.
- [20] D. T. Tran *et al.*, "Central pattern generator based reflexive control of quadruped walking robots using a recurrent neural network," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 62, no. 10, pp. 1497–1516, Oct. 2014.
- [21] X. Shao, Q. Huang, Z. Wang, and W. Wang, "Motion Planning and Compliant Control for a Quadruped Robot on Complicated Terrains," in *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2014, pp. 1587–1594.
- [22] A. W. Winkler, C. Mastalli, I. Havoutis, M. Focchi, D. G. Caldwell, and C. Semini, "Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain," *Robot. Autom. (ICRA), 2015 IEEE Int. Conf.*, pp. 5148–5154, 2015.
- [23] M. MacKay-Lyons, "Central Pattern Generation of Locomotion: A Review of the Evidence," *Phys. Ther.*, vol. 82, no. 1, pp. 69–83, 2002.
- [24] H. Nie, R. Sun, L. Hu, Z. Su, and W. Hu, "Control of a Cheetah Robot in Passive Bounding Gait," *J. Bionic Eng.*, vol. 13, pp. 283–291, 2016.
- [25] H. W. Park, M. Y. Chuah, and S. Kim, "Quadruped bounding control with variable duty cycle via vertical impulse scaling," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. Iros, pp. 3245–3252, 2014.
- [26] J. Z. Kolter and A. Y. Ng, "The Stanford LittleDog: A Learning and Rapid Replanning Approach to Quadruped Locomotion," *SAGE J.*, vol. 30, no. 2, pp. 150–174, 2011.
- [27] H. Kimura, Y. Fukuoka, and K. Konaga, "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot using a neural system model," *2000 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (Iros 2000)*, vol. 15, no. 8, pp. 859–878, 2001.
- [28] D. J. Matich, "Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones." Universidad Tecnológica Nacional, Rosario, p. 55, 2001.
- [29] J. Hernández, "Redes Neuronales Artificiales." Universidad Nacional de Colombia, Medellín, p. 27, 2016.
- [30] E. Armendáriz, P. Carbo, C. Hernández, and J. Hernández, *Ingeniería Bioinspirada*, Primera. Tamaulipas: Omnia Publisher SL, 2014.

- [31] J. Hernández and J. Ospina, "A multi dynamics algorithm for global optimization," *Math. Comput. Model.*, vol. 52, no. 7, pp. 1271–1278, 2010.
- [32] J. Hernández, J. Urrea, and C. Carmona, "Evolutionary Control Systems," in *Incorporating Nature-Inspired Paradigms in Computational Applications*, Hershey: IGI Global, 2018, pp. 195–237.
- [33] T. G. Kolda, R. M. Lewis, and V. Torczon, "Optimization by Direct Search: New Perspectives on Some Classical and Modern Methods," *SIAM Rev.*, vol. 45, no. 3, pp. 385–482, 2005.
- [34] J. M. Marín, "Correlación Lineal," *Universidad Carlos III de Madrid*. Madrid, 2010.
- [35] E. Rico and J. Hernández, "ANALYSIS AND APPLICATION OF A DISPLACEMENT CPG-BASED METHOD ON ARTICULATED." Medellin, 2015.
- [36] F. L. Moro *et al.*, "Horse-like walking, trotting, and galloping derived from kinematic Motion Primitives (kMPs) and their application to walk/trot transitions in a compliant quadruped robot," *Biol. Cybern.*, vol. 107, no. 3, pp. 309–320, Jun. 2013.
- [37] A. J. Ijspeert, "Cheetah Cub – a compliant quadruped robot," *Bioroborics Laboratory*, 2013. [Online]. Available: <https://biorob.epfl.ch/misc/archive/cheetah-2/>.