

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT BÍPEDO

Lic. Jesús José Contreras Martínez  
[jjcontras@hotmail.com](mailto:jjcontras@hotmail.com)  
Autor Responsable

*Instituto Tecnológico de Delicias  
Cd. Delicias, Chihuahua, México*

Ing. Edgar Talamantes Ortega  
[edgar.taor@gmail.com](mailto:edgar.taor@gmail.com)  
Autor Responsable

Ing. José Angel Chacón Castillo  
[jangelchc@gmail.com](mailto:jangelchc@gmail.com)

Ing. Jorge Luis González Hernández  
[glz\\_jorge@hotmail.com](mailto:glz_jorge@hotmail.com)

Ing. José Napoleón Rey Castillo  
[napoleon\\_rey@hotmail.com](mailto:napoleon_rey@hotmail.com)

M.C. Cyntia Araiza Delgado  
[cyntia@cimat.mx](mailto:cyntia@cimat.mx)

---

### Resumen

En esta investigación se presenta la construcción de un prototipo bípedo capaz de caminar cuasiestáticamente (a bajas velocidades). Se logro desarrollar una estrategia de caminata utilizando servomotores, lámina galvanizada, técnicas de construcción casera y elementos de costo medio para obtener un desarrollo sólido. También se incursionó en el uso del PIC18f4550 el cual es un microcircuito programable y favorece notablemente el funcionamiento y control de los servomotores. Con esto se emplea una arquitectura de control genérica para la robótica. El sistema de control ha sido desarrollado en un lenguaje de última generación, proporcionando un entorno profesional y amigable a la vista del usuario, fácil de manipular y lo más importante, creado de una forma que sirva de material didáctico para el estudio del movimiento biomecánico.

**Palabras clave:** Robot, servomotores, PIC, bípedo y Denavit-Hartenberg.

### Introducción

El ser humano es un sistema extremadamente complejo y eficiente. El análisis de los procesos humanos y la idea de diseñar y construir máquinas con forma humana son ancestrales. Los primeros estudios de movimientos humanos fueron realizados dentro del periodo 1870-1920 por los fotógrafos Marey y Gilbreth y Eadweard Muybridge. Desde entonces, la construcción de un robot humano se ha convertido en el santo grial que los científicos han intentado alcanzar por años.

La investigación de los robots humanoides constituye uno de los tópicos más apasionantes de la robótica. "Actualmente en el mundo existen cerca de 20 millones de maquinas bípedas caminantes e incluso capaces de correr" [1], cifra que puede ser asombrosa si se tiene en cuenta que aun no se sabe con certeza cómo éstas pueden hacer su trabajo, pero gracias al desarrollo de este cúmulo de maquinas los investigadores han ganado conocimiento sobre la biomecánica de caminar y los patrones de movimientos de los músculos. Este desarrollo histórico fue una inspiración para este trabajo. Se logró realizar una primera aproximación para que un prototipo robótico bípedo lograra desplazarse manteniendo el equilibrio dinámico basándose en el caminado del ser humano.

El proyecto fue realizado por el Equipo DEDALUS integrado por cuatro estudiantes de Ingeniería en Sistemas Computacionales con propósitos didácticos.

## **Estudio del Modelado Bípedo**

El ser humano está tan acostumbrado a su forma de caminar, que desde temprana edad pierde conciencia sobre el proceso en sí que esto implica. Al profundizar en esto se puede apreciar como este es un tema fascinante y sobretodo apasionante. Es interesante preguntar ¿el acto de caminar es un instinto? La verdad es que no; que el caminar es un proceso aprendido y no el producto de reflejos adquiridos de nacimiento. Es por eso que las personas tienen características propias en la manera de caminar.

Este proceso requiere de un gran desarrollo motor y control neural. Por eso los pequeños deben intentarlo varias veces, fallando las primeras ocasiones, hasta lograr una compleja organización neuronal para poder ejecutar patrones de movimientos coordinados que le permitan caminar con sus dos piernas, dejando a un lado el gateo.

Para comprender este estudio, se debe hacer énfasis en 3 aspectos.

1. El primero consiste en comprender cómo el ser humano camina, haciendo una descripción detallada de las fases que comprende esta actividad.
2. Se aclaran conceptos básicos sobre robótica, para comprender cómo se representaron las dos piernas como la unión de dos cadenas articuladas de  $N$  grados de libertad cada una y cómo a través de pulsos se generaron las secuencias de caminado.
3. Se describen algunos conceptos físicos como; torques, fuerzas, equilibrio dinámico, entre otros.

### **Descripción de las fases del caminado humano**

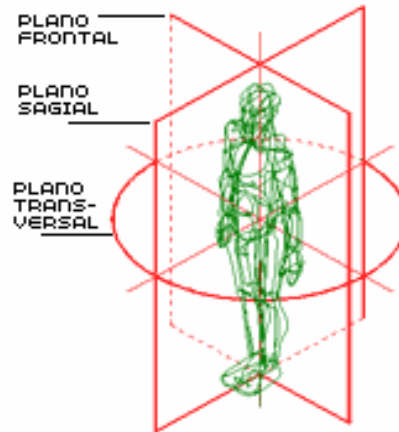
El caminado del ser humano es un proceso de locomoción bastante complicado, debido a que cada individuo tiene su manera particular de hacerlo. El movimiento ocurre en tres planos como se muestra en la Figura 1.

Durante este desplazamiento cada parte del cuerpo tiene un movimiento específico que colabora a mantener el equilibrio y hace que desplazarse erguidos sea posible. Sin embargo, por más particular e individual que sea el caminado de una persona, existen ciertas fases que son reconocibles y que se pueden generalizar.

Lo primero que hay que entender es que el caminar es un proceso cíclico, por lo tanto repetitivo, razón por la cual es posible dividirla en fases. La manera como se determinan las fases que componen el proceso, depende de la forma como se esté

analizando el proceso de caminar: (a) se puede analizar haciendo referencia a todo el cuerpo y cómo es soportado por cada pierna, y (b) se puede analizar el movimiento que realiza cada pierna por separado.

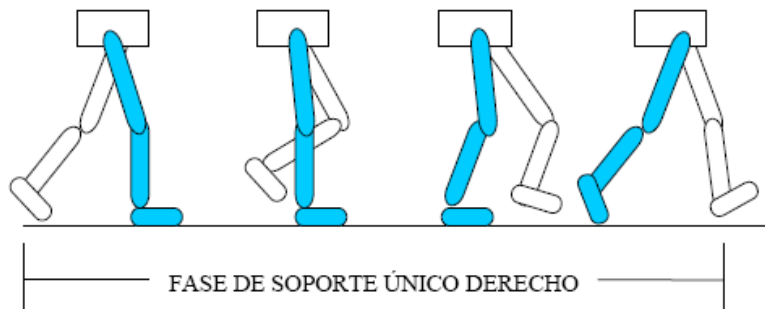
Al analizar el proceso de acuerdo a la primera manera, se tiene que el ciclo del caminado consta de 2 fases en realidad: fase de soporte doble (*double support phase*) y fase de soporte único (*single support phase*). El soporte único es realizado tanto por la pierna derecha como por la izquierda, lo que se identifica como soporte único derecho y soporte único izquierdo.



**Figura 1:** Planos de movimiento (Tomada de [3]).

### **Fase de soporte único (*single support phase*)**

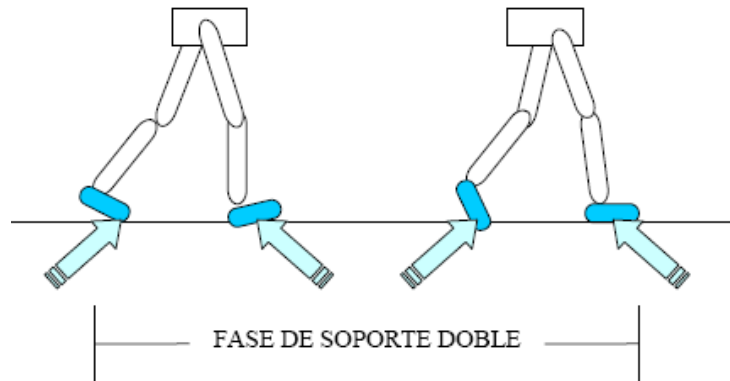
Durante la fase de soporte único, el pie al que se le hace referencia del soporte, es el que se encuentra apoyado sobre el suelo y relativamente estacionario. Es el encargado de mantener el peso del cuerpo, de ahí su nombre, "soporte". El comienzo de esta fase se puede distinguir cuando la otra pierna (la que no va a hacer el soporte) deja el suelo siendo la punta del pie lo último en estar en contacto con el suelo, y termina cuando esa misma pierna vuelve a tocar el suelo por medio del talón como se ve en la Figura 2.



**Figura 2:** Fase de Soporte Único Derecho (Tomada de [4])

### **Fase de soporte doble (*double support phase*)**

La fase de soporte doble se caracteriza porque los dos pies se encuentran en contacto con el suelo compartiendo el soporte del cuerpo. El comienzo de esta fase se reconoce cuando el talón de una pierna toca por primera vez el suelo y termina cuando la punta del pie de la otra pierna se despega del suelo. La duración de esta fase es bastante corta, pero indispensable ya que durante ella se hace el traspaso del soporte del cuerpo de una pierna a otra. Esto lo podemos observar en la Figura 3



**Figura 3:** Fase de Soporte Doble (Tomada de [4])

Al analizar el proceso de acuerdo a lo que hace cada pierna por separado, se debe tener en cuenta que cada pierna es vista como un proceso independiente, por lo tanto estaría dividido en fase de postura (*stance phase*) y fase de balanceo (*swing phase*). Cada una de estas fases se encuentra para las dos piernas respectivamente.

#### **Fase de Postura (*Stance Phase*)**

Esta fase representa el periodo de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en contacto con el suelo. Comienza cuando su talón toca el suelo y termina cuando los dedos del pie se despegan del suelo.

#### **Fase de Balanceo (*Swing Phase*)**

Esta fase se distingue porque es el periodo de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en el aire balanceándose hacia el frente.

Luego de haber analizado el caminar humano y haber realizado una descripción general, es necesario abordar ciertos conceptos básicos sobre robótica ya que para lograr los objetivos propuestos se deben describir las piernas como una cadena articulada que implica un tratamiento de los temas fundamentales de esta área. [4]

## **Conceptos Básicos Sobre Robótica**

### **Parámetros Denavit-Hartenberg**

Un eslabón siempre se encuentra relacionado o unido con otro eslabón a través de algún tipo de junta. Por eso se puede considerar que la adecuada definición del eslabón y su junta subsiguiente permiten la correcta descripción del sistema mecánico.

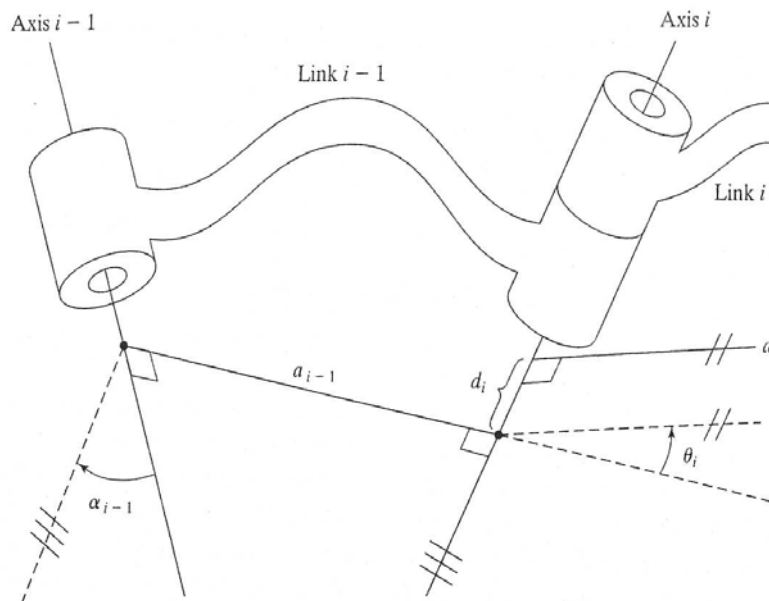
Para lograr esto, se han establecido dos parámetros para describir el tamaño y la forma del eslabón respectivamente y dos parámetros para describir la posición relativa de un eslabón con respecto a su predecesor. Estos cuatro parámetros se

deben a Denavit y Hartenberg, por lo que se les conocen como Parámetros Denavit-Hartenberg.

Los parámetros que definen el tamaño y la forma del eslabón son: la longitud de eslabón (*link length*) y la torsión de eslabón (*link twist*). Mientras que los parámetros que describen la posición relativa del eslabón con respecto a su predecesor son: separación de eslabón (*link offset*) que expresa la distancia entre los dos eslabones, y el ángulo de junta o articular (*joint angle*) que expresa el ángulo que forman los dos eslabones.

Nótese que los dos primeros parámetros (tamaño y forma) luego de ser definidos permanecen constantes (despreciando cualquier deformación física que se pueda presentar a causa del material), mientras que los parámetros relativos a la posición sí pueden variar dependiendo del tipo de junta con que esté asociado el eslabón.

Si la junta es de tipo prismático, el ángulo de junta o articular permanecerá constante entre los eslabones, pero su distancia sí estará variando debido a la junta. En cambio, si la junta es de tipo rotacional, la distancia entre los eslabones permanecerá constante, mientras que el ángulo que estos forman variará debido a la junta. La Figura 4 muestra los parámetros Denavit-Hartenberg.



**Figura 4:** Parámetros de Denavit-Hartenberg (Tomada de [2]; pg. 68)

## Análisis del Caminado Humano para la Implementación del Modelo

Para que el modelo del prototipo bípedo estuviera inspirado en la locomoción del hombre era necesario hacer un estudio sobre las características principales del caminado humano. Para desarrollar este propósito se consultó el reputado libro de Verne [6] y se extrapolaron las conclusiones más importantes. A continuación, se

presenta el análisis realizado para obtener los parámetros de caminata en los cuales el modelo se basó.

### **Locomoción Bípeda**

Entre los factores que influyen en la locomoción de una persona se pueden mencionar los siguientes:

- Contextura física
- Tipo de zapatos utilizados
- El estado de ánimo, entre otros

Sin embargo, a pesar de estos rasgos característicos de cada persona, existen parámetros generales que todas las personas comparten a la hora de desplazarse:

- Existe un movimiento oscilatorio en las piernas
- El cuerpo se levanta y cae con cada paso
- El movimiento en el plano sagital es grande; a pesar de esto los desplazamientos angulares de las juntas son pequeños.

Estas características comunes fueron la base para encontrar los parámetros fundamentales de caminata que debe seguir el prototipo bípedo. En la mayoría de estudios realizados para obtener estos patrones del caminado humano lo que se hace es repetir los experimentos con muchas personas de distintas características y al final se calcula un promedio de las variables.

### **Proceso del Caminado**

Un factor muy importante en la locomoción bípeda es que el cuerpo regula el proceso para que sea lo más eficiente. En otras palabras, minimizar la energía metabólica requerida para caminar. Como el robot es un modelo simplificado de las piernas del hombre, hay grados de libertad que no se están teniendo en cuenta. Esto lleva a la conclusión inmediata de que el prototipo va a caminar con menor eficiencia que un hombre. Esto se verá reflejado en un mayor trabajo por parte de los actuadores (motores) del prototipo cuando se implemente.

Como se mencionó anteriormente el caminado humano es un proceso en el cuál el cuerpo es soportado primero por una pierna y luego por la otra. Siempre existe por lo menos un pie en el piso y en la etapa de doble soporte están los dos. En este proceso existen dos requisitos básicos que deben cumplirse:

- 1) Deben existir fuerzas de reacción del piso que soportan el cuerpo.
- 2) Debe haber un movimiento periódico de cada pie de una posición de soporte hacia la siguiente en la dirección del movimiento.

Estos dos elementos son necesarios para cualquier tipo de caminado bípedo, así existan limitaciones físicas como las prótesis. Por lo tanto, un robot bípedo también debe cumplir estos parámetros para que se ajuste a la definición de locomoción bípeda.

### **Variables importantes en la etapa de soporte único**

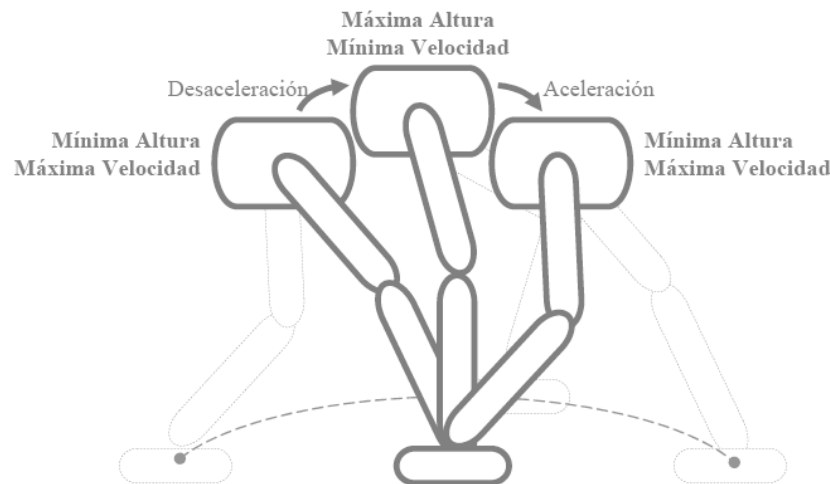
Cuando el cuerpo se encuentra en la fase de soporte simple, existen tres características fundamentales que intervienen en el desplazamiento:

- 1) Con cada paso el cuerpo acelera y desacelera.

- 2) Con cada paso el cuerpo se levanta y cae unos pocos centímetros.
- 3) Existe un leve movimiento de balanceo de un lado a otro en el plano frontal.

El cuerpo debe acelerar y desacelerar en cada paso porque el soporte de las piernas no se encuentra debajo del cuerpo en todo momento. Si el hombre caminara estáticamente, esta variación de la aceleración no sería necesaria. Si esto fuera así, el ritmo de vida sería mucho más pausado debido a que como se mencionó anteriormente, caminando en equilibrio estático no se pueden obtener velocidades altas de desplazamiento. Por lo tanto, es debido a esta variación de la aceleración que el hombre puede caminar dinámicamente.

Al principio el pie de soporte se encuentra adelante del cuerpo. Mientras se balancea y el cuerpo llega a estar justo encima del pie de soporte hay una desaceleración. Finalmente, desde este momento hasta que el pie de soporte se encuentra completamente atrás del cuerpo hay una aceleración. Se puede apreciar gráficamente lo anterior en la Figura 5.



**Figura 5** Etapa de Soporte Único (Plano Sagital): Pierna de Apoyo y Cadera (Tomada de [4])

Esto en la plataforma bípeda se ve reflejado en el criterio del ZMP (Zero Moment Point - Punto de momento cero). Como se mencionó anteriormente, el ZMP tiene en cuenta la dinámica del movimiento, es decir la aceleración de cada junta. Por lo tanto, es fundamental para cumplir el objetivo obtener el ZMP del modelo del prototipo bípedo.

A medida que el cuerpo pasa por la pierna de soporte se levanta justo hasta cuando el pie está por debajo y luego empieza a descender. Es importante mencionar que el punto de elevación más alta se da cuando la velocidad es la menor y el punto de elevación más baja se da cuando la velocidad es la mayor.

El cuerpo presenta un leve balanceo lateral hacia el pie de apoyo. La pelvis tiene su máxima desviación en la mitad de la etapa de soporte único y después empieza a desplazarse hacia el próximo lado de soporte. El modelo del prototipo no tiene este

grado de libertad. Por lo tanto, es importante que los pasos no sean muy anchos y de esta manera poder desprestigiar el movimiento lateral del cuerpo. También se compensó este movimiento al hacer la separación entre los pies mínima.

### Desplazamiento del Cuerpo Durante el Caminado

Durante el caminado, el centro de masa tiende a permanecer en la pelvis. Esto es muy conveniente para el desarrollo del modelo del robot debido a que se pueden planificar las trayectorias concentrándose en la pelvis. En el caso del prototipo, la cadera es el eslabón principal. Por lo tanto, se analizaron las características del movimiento de la cadera en el hombre.

### Implementación del modelo

Esta etapa del proyecto consiste en elaborar un modelo aproximado de un prototipo bípedo. Este es representada como una cadena articulada que incluye las dos piernas cada una constituida por: un pie, una pantorrilla y un muslo, y la cadera encargada de unir las dos piernas por los muslos.

Cada pierna tiene 3 grados de libertad conformados por las juntas rotacionales del tobillo, la rodilla y la cadera y además, se asumió que las piernas sólo tienen movimiento sobre un plano, lo que las limita a moverse sólo en 2 ejes de coordenadas. Este es un modelo simplificado, ya que una pierna humana de verdad está constituida por un número mayor de grados de libertad y su movimiento no está limitado a un solo plano.

Partiendo de lo anterior, se desarrolló un modelo (Figura 6) donde se hace uso de una cadena articulada conformada por 6 juntas rotacionales y 7 eslabones. (Es importante tener presente que en este caso todos los ángulos de junta están en cero grados)

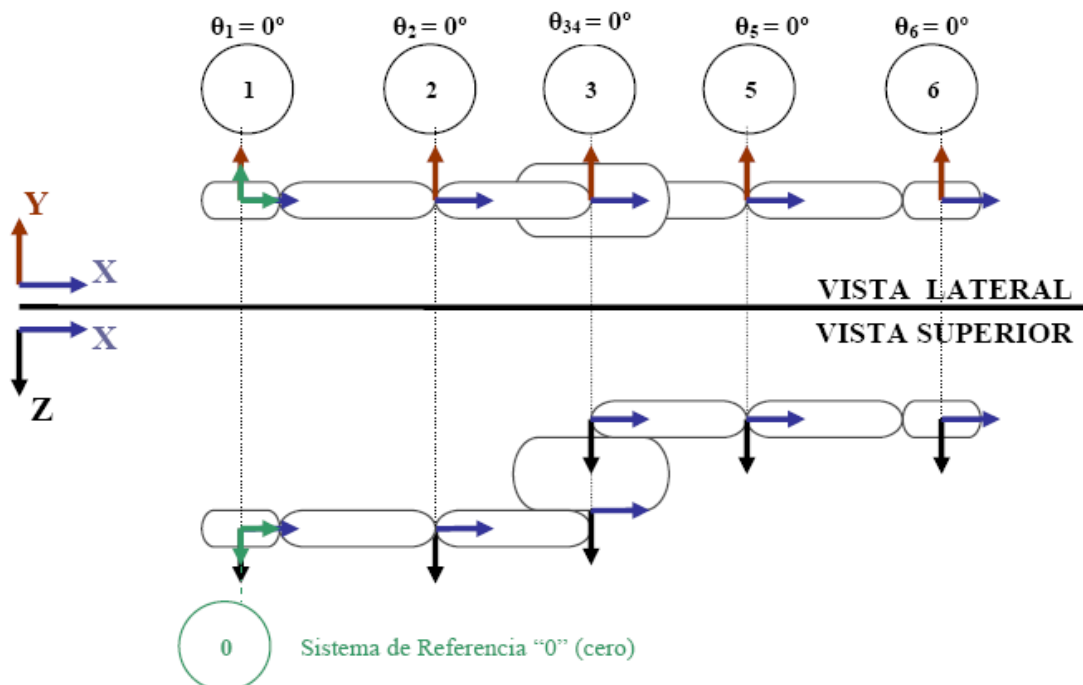
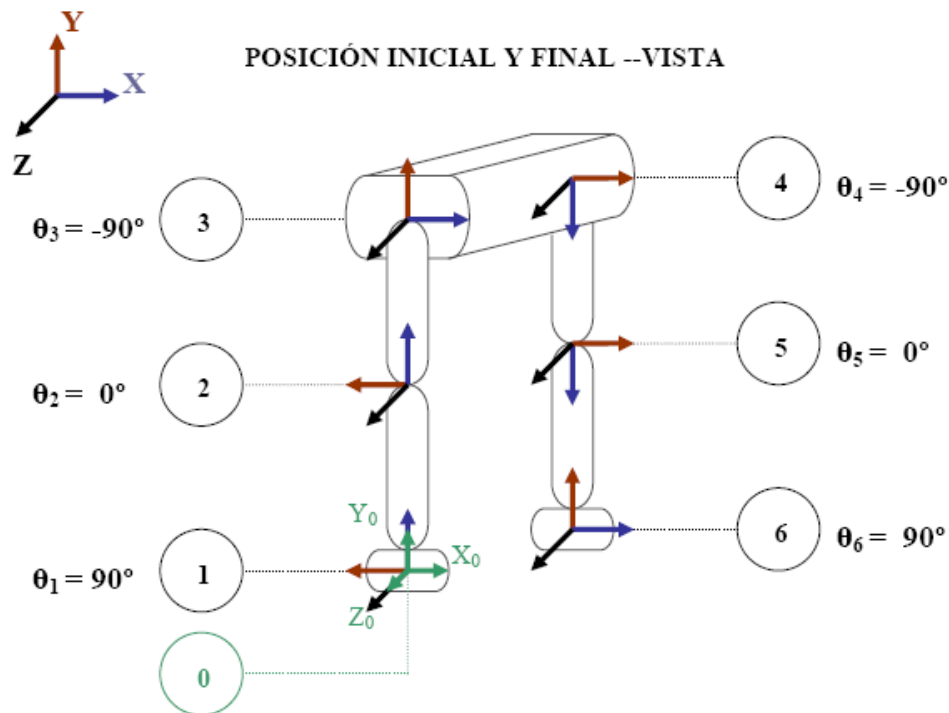


Figura 6: Cadena articulada con sus marcos de referencia (Tomada de [4])

Para que la cadena articulada represente el modelo del prototipo bípedo, como dos piernas unidas por una cadera, los ángulos de junta se deben encontrar en ciertos valores para obtener la posición inicial, como muestra la Figura 7.



**Figura 7:** Condiciones iniciales de junta para la posición inicial y final de posición (Tomada de [4])

## Diseño del Modelo Bípedo

### Estudio de materiales

Para la elaboración del prototipo bípedo se estudiaron diferentes materiales posibles para así seleccionar el más adecuado según las características mencionadas en la Tabla 1.

| Materiales         | Maleabilidad | Resistencia | Peso  | Costo de Adquisición |
|--------------------|--------------|-------------|-------|----------------------|
| Madera             | Baja         | Media       | Medio | Medio                |
| Acrílico           | Media        | Media       | Bajo  | Medio                |
| Aluminio           | Alta         | Alta        | Bajo  | Alto                 |
| Lamina Galvanizada | Alta         | Alta        | Bajo  | Medio                |

**Tabla 1:** Características de materiales.

Los parámetros de búsqueda requerían de un costo no muy elevado, que el material fuera fácil de moldear con un peso lo suficientemente ligero para ahorrarle trabajo a los motores, además de la existencia del producto en el mercado local.

Una vez que se catalogaron las características, se eligió la lámina galvanizada ya que cumple con todas las expectativas necesarias para crear el cuerpo del robot.

### Diseño de las Piezas

Las piezas se diseñaron de acuerdo con las dimensiones de los motores seleccionados. Las piezas están pensadas de forma prismática para el óptimo movimiento entre ellas y la sencilla unión entre las articulaciones, el resultado final de esto se puede observar en la Figura 8. En la Tabla 2 se muestran las características principales de robot Icarus.



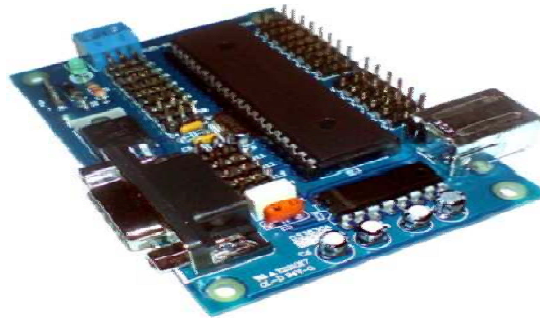
**Figura 8:** Robot Icarus

| Datos                  | Valores                   |
|------------------------|---------------------------|
| Peso                   | 994 gr                    |
| Altura                 | 24.5 cm                   |
| Ancho                  | 24 cm                     |
| Grosor                 | 11.5 cm                   |
| Grados de libertad     | 9                         |
| Numero de Servomotores | 11                        |
| Servomotores           | HiTec HS-322 HD           |
| Torque del servomotor  | 3.0 Kg-cm                 |
| Controladora           | JVM-SERVO 28<br>USB/RS232 |
| Voltaje empleado       | 6.0 Volts                 |
| Amperaje               | 1200 mA                   |

**Tabla 2:** Características Icarus

### Circuito JVM-SERVO 28 USB/RS232

Este circuito (Figura 9) puede manejar 28 servomotores al mismo tiempo, teniendo como puertos de comunicación el RS232 (Puerto serie) y el USB (Universal serial bus). El microcontrolador PIC18F4550 es el encargado de procesar las señales recibidas del software y mandar los pulsos a los pines para el control de casa articulación.



**Figura 9:** Microcontrolador de 28 Servomotores (Tomada de [5])



## **Programación del Driver**

La estrategia que combina un lenguaje de programación de última generación con un proyecto de esta naturaleza hace que la plataforma .Net sea la herramienta más fiable para la construcción de un software que cumpla con la evolución constante en el mundo informático.

Con esto se pretende crear un entorno seguro, y sobretodo, capaz de llevarse a nuevas expectativas que la misma plataforma respalda. Esta fue la decisión tomada por el equipo para la generación del Icarus Driver, que se describe a continuación.

### **Icarus Driver**

Una vez estudiado y aprendido el lenguaje de programación, se crea la aplicación que controlara a la plataforma bípoda Icarus. El software de control llamado "Icarus Driver" en la versión 1.0. Este programa está realizado para que sea amigable con el usuario y sobretodo muy intuitivo. La instalación es sumamente sencilla de realizar y requiere un mínimo espacio en disco duro.

El software está diseñado para detectar la tarjeta controladora, no siendo indispensable trabajar en él. Consta de un entorno gráfico que permite observar y controlar el movimiento de los servomotores (Figura 11), además de ofrecer opciones útiles de control tales como: ligar el comportamiento de servomotores, funcionamiento en tiempo real, velocidad de ejecución y zoom en el área de trabajo, entre otras.

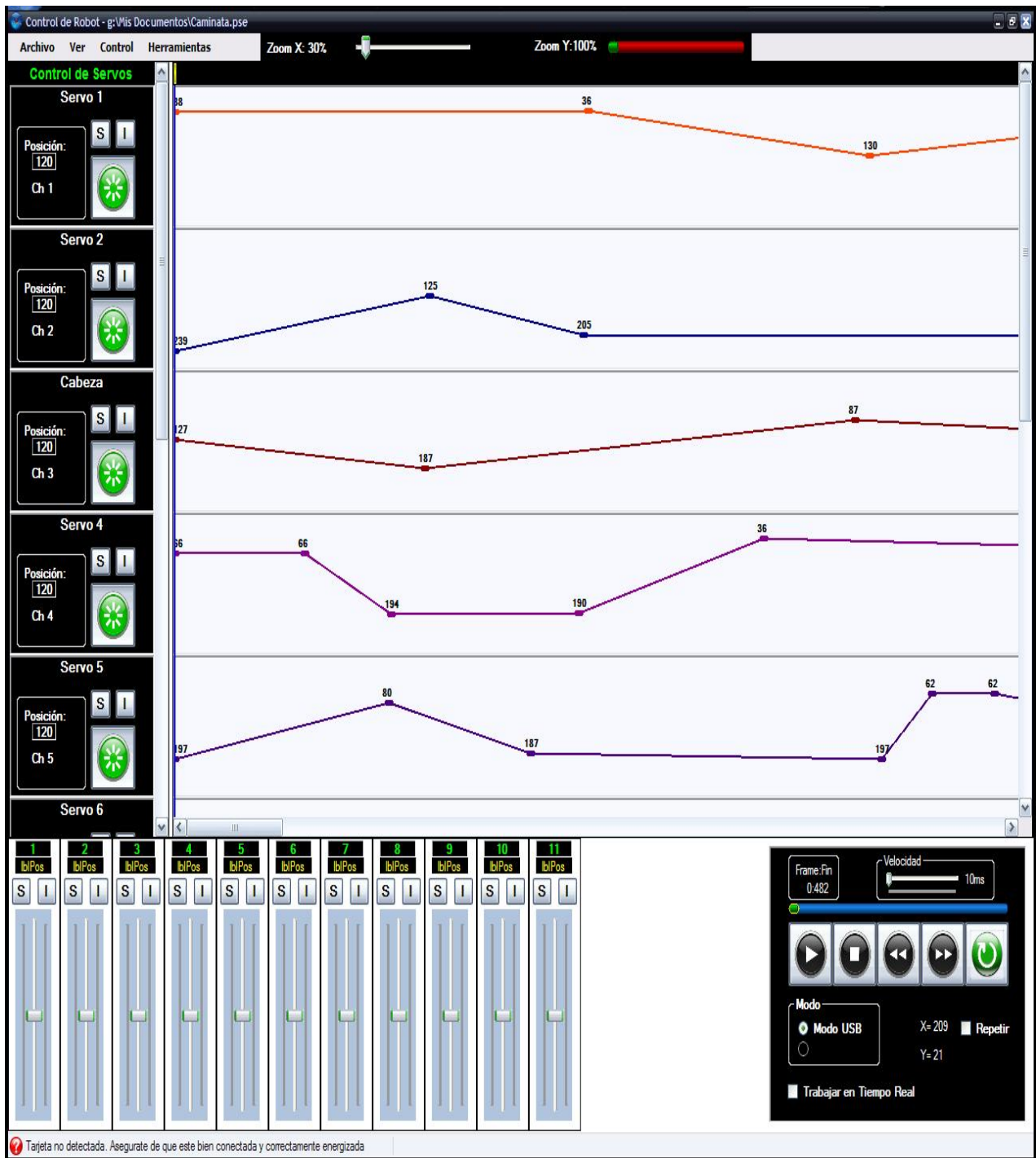
El "núcleo del Driver" es sustraído del código proporcionado por el autor de la tarjeta controladora, siendo este código libre. En base a esto se desarrolló la interfaz grafica y las funciones necesarias para este proyecto, aunque cabe destacar que este software puede funcionar con cualquier tipo de configuración robótica que utilice la tarjeta controladora JVM-SERVO 28 USB/RS232 haciendo de esto su mejor característica.

El Driver es generado de forma que sirva en la formación académica, no requiere de cálculos matemáticos para el funcionamiento de la plataforma Icarus, y simplemente se interactúa con ella para lograr los movimientos deseados.

## **Conclusiones**

Se concluyó el proyecto satisfactoriamente pues se cumplió con los objetivos planeados. El robot llamado "Icarus" camina por sí mismo y se creó este documento, que a nuestro pensar, es bastante sólido y fundamentado, además de ser muy útil como guía si se emprende algún proyecto similar.

El desarrollo de este proyecto nos proporcionó una gran gama de nuevos conocimientos en el área de robótica, ya que este tema de investigación es relativamente nuevo en nuestro entorno. También esperamos dejar huella en nuestro Instituto y la región, sembrando la semilla de la inquietud para que otros estudiantes se animen a materializar sus propias ideas, porque sabemos que el ingenio y la creatividad existen entre los estudiantes. Además queremos enfatizar que el trabajo en equipo fue vital para la realización de este proyecto que hubiera sido tremendamente complicado y costoso si se tratara de un solo individuo.



**Figura 11:** Vista del software "Icarus Driver"

Para aquellos que nos preguntaron alguna vez ¿Qué hace el robot? ¿Sólo Camina? Sí, solo camina. Parece algo sencillo pero solamente los que se adentran en esta área entienden la dificultad que implica lograr un robot caminante. Aunque el mismo no tenga una utilidad práctica o comercial, tiene un beneficio muy importante que es el conocimiento y valiosa experiencia que hemos adquirido.

El equipo de trabajo que desarrolló este proyecto esta formado por cuatro estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, los cuales esperamos que este proyecto sea el inicio de un futuro colmado de logros porque demostramos que no tenemos miedo al trabajo y mucho menos al fracaso. Como alguien dijo alguna vez: *"Caballeros, ¿debo recordarles que mis probabilidades de éxito aumentan en cada nuevo intento?"*

## Referencias

- [1] Nagazaki T., Kajita, S., Kameko, K, y Yokoy. K. **"A running experiment of humanoid biped"** Proceedings of the International Conference of Intelligent Robots and Systems, 2004, pp 515.
- [2] Gómez, A. R. **"Seminario de diseño y construcción de microrobots"** Ing. Técnica de Telecomunicación. Sistemas de Telecom. 2006.
- [3] **Laboratorio de Ergonomía y Biomecánica**, consultado el 28 de septiembre del 2007, <http://landaben.dointeractiva.com/imgfiles/1/biomecanica01.gif>
- [4] Pontón Venegas, C. y Santacruz Rosero, C.F. **"LIMBO – PLATAFORMA BÍPEDA"** Pontificia Universidad Javeriana Facultad de ingeniería, carrera de ingeniería electrónica, Bogotá. Noviembre, 2006.
- [5] **JVM-SERVO**, consultado el 13 de Agosto del 2007, "<http://www.jvmbots.com/> "
- [6] Verne, I., *Human Walking*; WILLIAMS & WILKINS, Baltimore, 1981.