

**XVIII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA “SIE 2019”**

**Implementación y control de un
emulador de cuello humano.**

Implementation and control of a human neck emulator

**Eduardo Pastor Torres¹, María Aurora Diozcora Vargas Treviño², Sergio Vergara
Limón³, David Eduardo Pinto Avendaño⁴.**

1- Lic. Eduardo Pastor Torres. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

E-mail: edypastor@gmail.com

2- Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: auroravargast@hotmail.com

3- Dr. Sergio Vergara Limón. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: svergara2@hotmail.com

4- Dr. David Eduardo Pinto Avendaño. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. E-mail: davideduardopinto@gmail.com

Resumen: En los últimos años se ha tenido el interés en el desarrollo de sistemas mecatrónicos capaces de emular los movimientos del cuerpo humano. Se han desarrollado este tipo de sistemas desde el siglo XV y al día de hoy siguen siendo un tema de suma importancia en el área tecnológica puesto que aún hay muchos temas que se discuten con el fin de optimizar los diseños de robots humanoides. En el presente trabajo se estudia el problema relacionado al sistema del cuello de un robot humanoide, mismo que permite el control de movimiento y orientación de la cabeza del robot el cual deseamos que emule el movimiento que tenemos los seres humanos. Por ello, se propone el diseño de un mecanismo de dos grados de libertad, el cual otorgará el movimiento flexo-extensión (hacia adelante y hacia atrás) además de movimiento rotacional. Se implementa un lazo de control dada la retroalimentación de posición de los motores y controlado por un

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



procesador emulado dentro de un FPGA. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos referentes a comportamiento de movimiento del cuello y cabeza, se observan los elementos robustos del sistema además de sus limitaciones o deficiencias y se otorgan las conclusiones sobre el trabajo a futuro para la optimización del sistema.

***Abstract:** In recent years people have had interest on developing mechatronic systems capable of emulating body human movements. This kind of systems have been developed since XV century and up to date the topic continues being of interest for technological researches because there are several topics in dispute, thus, improve the humanoid robots design. In this paper we pretend to research the problem related to neck system for a humanoid robot, which allow head movement and orientation control as similar as humans do. Our proposal is the design of a 2 degrees of freedom (DOF) mechanism, capable of emulate pitch movement and yaw movement. The close-loop control will be done given the engine feedback through its encoders and controlled with a microprocessor developed on a FPGA. Finally, we analyze the given results in neck movements detecting the strong and weak performs, hence, we conclude talking about the future research to strength the neck mechanism.*

Palabras Clave: Robots humanoides; Mecanismo; Control; Diseño; Cuello.

Keywords: Humanoid robots; Mechanism; Control; Design; neck.

1. Introducción

Un robot humanoide emula las características físicas de los seres humanos, en general, se caracterizan por tener torso con cabeza, extremidades como brazos y piernas, entre otros (Bingtuan Gao, 2011); debemos resaltar que dependerá del área de desarrollo o investigación quien determine las partes a considerar, en algunos casos se interesan únicamente en desarrollar tecnología de la cintura hacia arriba o al revés; el enfoque puede acotarse en la parte de la cabeza donde los objetivos se basan en el control de la

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



boca, ojos, etc., donde se implementan sistemas de visión artificial o comunicación con seres humanos.

En el análisis del mecanismo de una cabeza de un robot humanoide existe un gran interés de investigación y esta se debe al gran interés de tener robots capaces de asistir a los seres humanos día a día, no obstante, es importante lograr una comunicación natural entre el robot y el ser vivo; la comunicación entre humanos no necesariamente es verbal, el 60% de la comunicación se aplica en gestos y expresiones faciales (Frank H. Netter, 2014). Por ello, hoy día es importante determinar su habilidad y aspecto a cumplir, entre ellas contemplan la expresión de emociones.

El control de una cabeza de un robot humanoide se tiene como pieza clave la interacción con el cuello (Rob Reilink, 2011), misma que proporciona dinámica a la cabeza y, consecuentemente, facilita esa comunicación con los seres humanos.

Leonardo da Vinci postula el primer modelo de lo que ahora conocemos como robot humanoide a finales del siglo XV, con forma de un soldado, capaz de realizar algunos movimientos de los hombros, manos, codos, muñecas, caderas, rodillas, piernas y tobillos (Allonrobots., 2013). En la tercera década del siglo pasado resultaran robots como “Elektro”, desarrollado por Westinghouse Electric Corporation entre 1937 y 1939, capaz de caminar y pronunciar alrededor de 700 palabras (History of information, 2015). Otro de los robots humanoides fueron lanzados por Honda en la década de los noventa, los primeros 3 modelos: P1, P2 y P3, hábiles al momento de caminar y reduciendo volumen y peso en cada generación (Honda, 2016). Actualmente se encuentra la empresa Boston Dynamics, especializada en el desarrollo de robots humanoides, perfeccionándolos para que tengan movimientos cada vez más naturales. El año pasado se lanzó un robot llamado Atlas, mismo que se ha mostrado en un video con habilidades sorprendentes tales como saltar un tronco o incluso saltan de modo escalonado, actividad asemejada a la práctica de parkour (Technology, MIT Proyects, 2013).

En el desarrollo de cuellos existen sistemas de 2 a 4 grados de libertad que, generalmente, se manipulan a través de cuerdas acopladas a motores para propiciar diversos movimientos que se requieren (Technology, News Magazine MIT., 2008). En cambio, nuestra propuesta es la implementación de un robot de 2 grados de libertad, ambas

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

articulaciones de tipo rotacional, actuadas por un par de motores acoplados a unos rotores a través de una banda con la finalidad generar los movimientos flexo-extensión y rotacional. Cada motor de corriente directa tiene un encoder que permite monitorear el posicionamiento de este, con ello, se genera una retroalimentación de posición a una tarjeta FPGA que trabaja como procesador, logrando ejecutar el controlador para dar orientación a la cabeza del robot humanoide.

2. Metodología

2.1 Diseño mecánico

La propuesta del sistema mecánico para el control de la cabeza del robot humanoide "Figura 1", la primera articulación se acopla a través de una banda junto al motor del lado derecho (M1), dicha articulación permite el movimiento flexo-extensión de la cabeza. El segundo grado de libertad se encuentra al centro del robot, el movimiento generado es el denominado rotacional por el motor (M2) que se encuentra en posición vertical. Los ejes de coordenadas seleccionados se han propuesto basados en la convención de Denavit-Hartenberg, una técnica para el estudio de sistemas dinámicos (Cortés, 2011). Para fines prácticos, se considera el primer sistema de coordenadas $\Sigma_0 = x_0, y_0, z_0$, mismo que se comparte con la primera articulación, el cual provoca movimiento flexo-extensión. El segundo sistema de coordenadas $\Sigma_1 = x_1, y_1, z_1$ ha sido seleccionado de tal forma que el eje z_1 es el eje en el que rota la cabeza como normalmente lo hacemos los seres humanos.

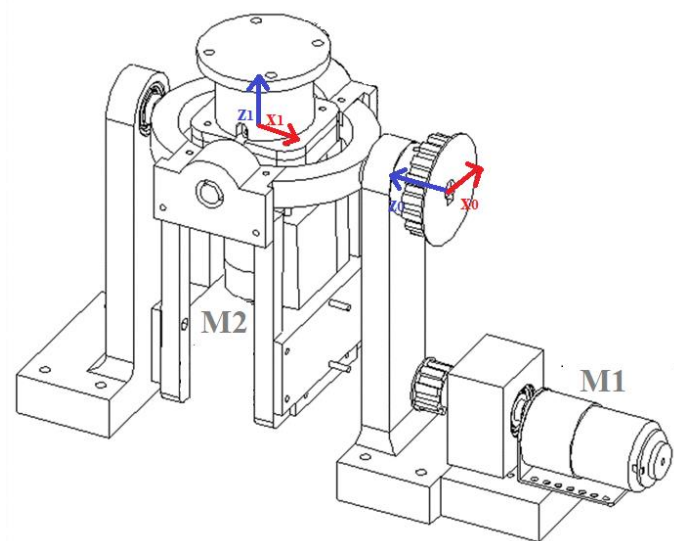


Figura 1: Diseño mecánico propuesto para control de cuello de 2 grados de libertad, fuente: elaboración propia.

2.1.1 Cinemática

Partiendo del modelo desarrollado, se hace el análisis de la cinemática directa, la cual permite conocer el posicionamiento de un servomecanismo en el espacio de trabajo. Analizando la primera articulación acoplado a un vector de radio r posicionado en $[x \ y \ z] = [0 \ 0 \ r]$, la matriz de rotación generada por la articulación 1 se denota como $P_1 = R_{y_0}(\theta)$ (Alberto, 2007). Al analizar el sistema de rotación de la segunda articulación denotada por ϕ , la rotación para el segundo punto toma la forma de $P_1 = R_{z_1}(\phi)$ entonces, el sistema que posee dos grados de libertad, ambos de movimiento rotacional y la cinemática directa será representada como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) \\ r \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\phi) \\ r \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Consecuentemente se realiza el estudio de la cinemática diferencial, lográndose al derivar el cambio de posición respecto al tiempo (Valencia, 2008), esto permite conocer la velocidad que tomará el sistema en cada una de las coordenadas involucradas. Como la longitud r es una constante, esta no sufre cambios por la derivada, sin embargo, los ángulos son variable, entonces aplicamos la derivada a θ y ϕ , con ello (5) representa la cinemática diferencial del sistema.

$$v = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\phi) \dot{\phi} + r \cos(\phi) \operatorname{sen}(\theta) \dot{\theta} \\ r \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) \dot{\phi} + r \operatorname{sen}(\phi) \cos(\theta) \dot{\theta} \\ -r \operatorname{sen}(\theta) \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 Dinámica

El modelo dinámico o par de un sistema mecánico puede ser denotado generalmente por la expresión (6), además, es necesario conocer el modelo de energías involucradas en el sistema para conocer la función Lagrangiana, denotada en (7)

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



$$\mathcal{T} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} \quad (3)$$

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = E_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}) \quad (4)$$

Por ley de conservación de la energía, la energía cinética de un servomecanismo tiene la forma general de $E_c = \frac{1}{2}mv^T v + \frac{1}{2}I\dot{q}^2$, donde m es la masa del sistema, v es la cinemática diferencial o velocidad que adquiere nuestro servomecanismo e I es el momento de inercia generado en el sistema. Retomando la ecuación (5) y multiplicándola por su transpuesta, tenemos (9) como la energía cinética del sistema. Por otro lado, la primera articulación de nuestro sistema es la única que genera variaciones respecto al eje Z , el cual ha sido considerado el eje con efecto gravitacional, entonces es la única articulación que genera un aporte a la energía potencial, entonces (10) describe dicha energía. Finalmente, podemos calcular el Lagrangiano el cual toma la forma de (11).

$$v^T v = r^2[\dot{\phi}^2 \text{sen}^2(\theta) + \dot{\theta}^2] \quad (5)$$

$$E_c(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2}mr^2[\dot{\phi}^2 \text{sen}^2(\theta) + \dot{\theta}^2] + \frac{1}{2}I(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2) \quad (6)$$

$$U(\theta) = mgr \cos(\theta) \quad (7)$$

$$\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}, \dot{\phi}) = \frac{1}{2}mr^2[\dot{\phi}^2 \text{sen}^2(\theta) + \dot{\theta}^2] + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\phi}^2 - mgr \cos(\theta) \quad (8)$$

Las ecuaciones permiten calcular el modelo dinámico mostrado en (6), basta con retomar (11) y calcular tanto la derivada parcial respecto a la posición como la derivada parcial respecto a la velocidad. Los cálculos mencionados se realizan para cada componente del sistema, $(\theta, \dot{\theta})$ y $(\phi, \dot{\phi})$, por lo que el modelo dinámico de θ es dado por (12) y el modelo dinámico de ϕ mostrado en (13).

$$\mathcal{T}_\theta = \ddot{\theta}mr^2 + \ddot{\theta}I - mr^2\dot{\phi}^2 \text{sen}(\theta)\cos(\theta) + mgr \text{sen}(\theta) \quad (9)$$

$$\mathcal{T}_\phi = mr^2\ddot{\phi} \text{sen}^2(\theta) + I\ddot{\phi} \quad (10)$$

2.2 Algoritmo de control

Para cumplir el objetivo de posicionar el efector final de nuestro robot se propone un algoritmo de control adecuado, la tangente hiperbólica (14) es una función adecuada acorde a la literatura (Cortés, 2011), se selecciona este esquema de control por ser tipo acotada, lo cual permite no saturar el par que puede otorgar cada uno de los motores. Las ganancias propuestas en el modelo dinámico para K_p y K_v están expresadas en (15) y (16), la sintonización se genera partiendo del par máximo de cada motor, recalculado al 80%, consecuentemente se varían los valores hasta conseguir los errores más pequeños.

$$\tau = K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) + g(q) \quad (11)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 0.48 & 0 \\ 0 & 0.48 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 0.45 & 0 \\ 0 & 0.45 \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 Hardware y software implementado

El control y adquisición de datos se realiza con ayuda del procesador que es emulado en la tarjeta de desarrollo DE0-CV (Figura 2) que incorpora un FPGA cyclone V 5CEBA4F23C7N de Altera. El procesador tiene una unidad de control general además de módulos dedicados a la lectura de los encoders del motor y módulos generadores de pulsos modulables "Figura 3", con este es posible generar leyes de control para cada uno de los grados de libertad existentes en el modelo. La interfaz implementada se realizó a través de LABVIEW, donde se hace la comunicación de la computadora con la tarjeta vía WIFI.

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

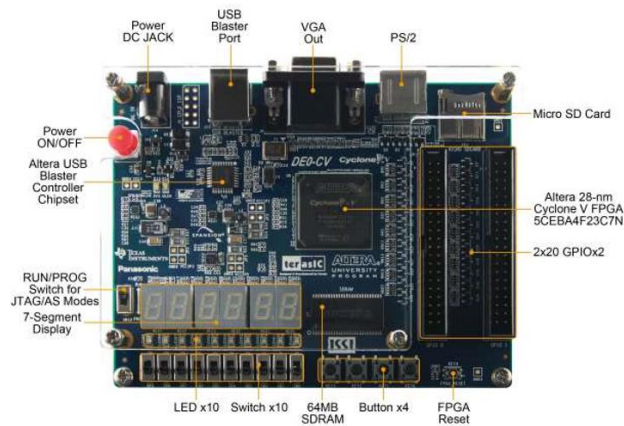


Figura 2: Tarjeta de desarrollo DE0-CV implementada en experimento, fuente: Intel.

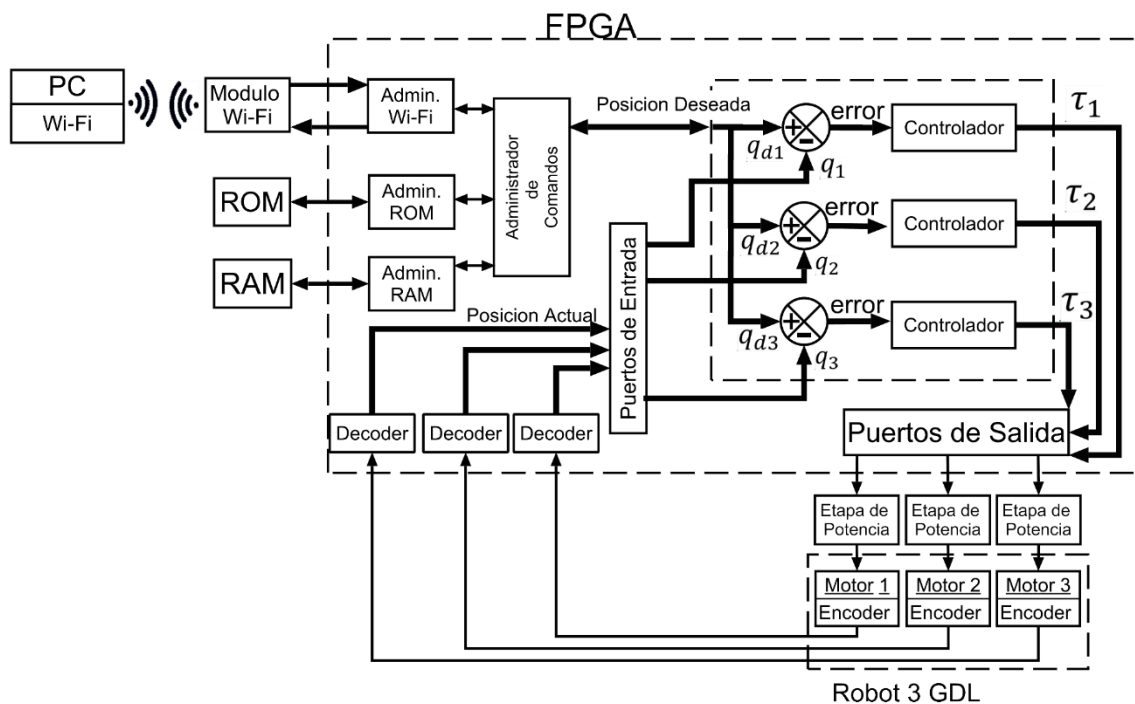


Figura 3: Arquitectura de procesador emulado en FPGA.

3. Resultados y discusión

3.1 Interfaz de usuario

Se ha desarrollado una interfaz de usuario "Figura 4" que permite variar los valores de parámetros deseados en el experimento, es posible asignar los valores angulares en cada uno de los motores, además de variar las ganancias del algoritmo de control.

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Figura 4: Interfaz de usuario para control de robot.

3.2 Respuesta de torque en mecanismo

El robot se somete a prueba con el esquema de control tangente hiperbólica (14), la acción de control se traduce a una señal PWM con frecuencia de 110Hz, se varía el ancho de pulso porcentualmente y la señal es amplificada por un arreglo de transistores. La respuesta de los motores implementados para lograr la posición del efector final descrito en (17) se ven en la Figura 5, en dicha gráfica se observa el torque generado por cada motor, el primer motor aplica un torque pico menor a 4 Nm., éste es el de mayor valor debido a que es el que carga todo el mecanismo desarrollado. Por su parte, el segundo motor otorga un torque menor a 0.5 Nm. Referente al control de posición, en la Figura 6 se observa el comportamiento de la primera articulación al someterse al sistema de control propuesto, la posición deseada para dicho elemento es 20° y su punto de partida es el origen, el tiempo de asentamiento es cercano a dos segundos.

$$q_d = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20 \\ -10 \end{bmatrix} \quad (14)$$

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

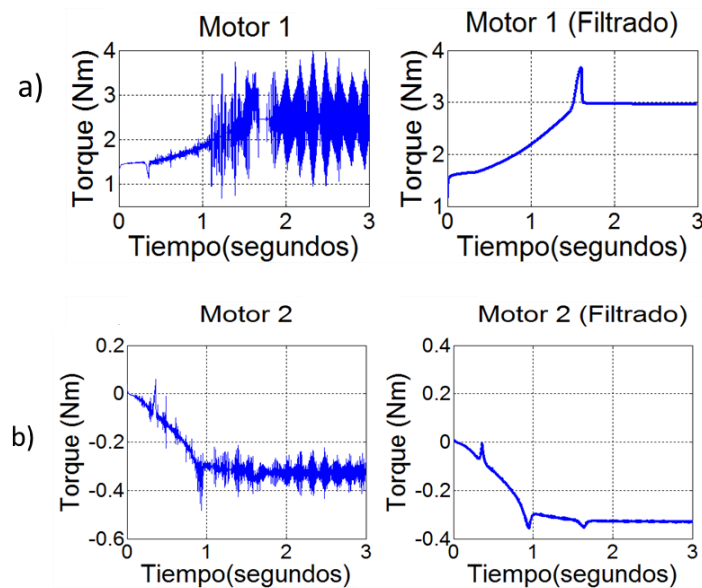


Figura 5: Respuesta de motores de sistema mecánico para posicionamiento deseado, fuente: elaboración propia.

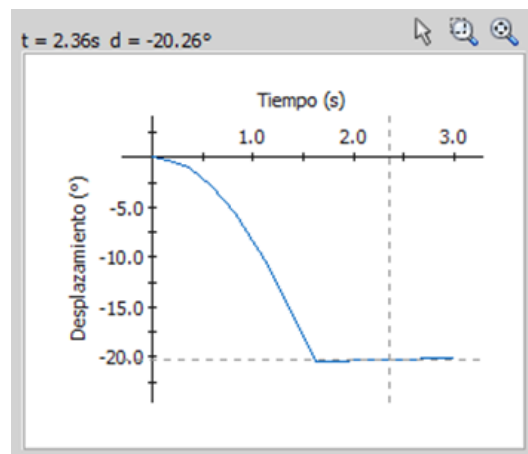


Figura 6: Cambio de posición en el tiempo de primer articulación.

4. Conclusiones

El sistema mecánico propuesto permite posicionar el efector final en un campo espacial amplio, no obstante, este presenta algunas limitaciones al compararlo con el comportamiento natural de la cabeza humana, por lo que se está planeando añadir un tercer grado de libertad el cual emule el movimiento bilateral (izquierda-derecha). La ley de control tangente hiperbólica manifiesta una respuesta aceptable para ganancias bajas como la documentada en este artículo, sin embargo, es posible modificarla con fines académicos para analizar la respuesta al mismo. Acorde a las especificaciones de los

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



motores de corriente directa implementados, estos están operando a menos del 50% de su capacidad total, la cual es favorable para prolongar la vida útil de los motores.

5. Referencias bibliográficas

- Alberto, I. (2007). Rotaciones multidimensionales generales. *Universidad de las Américas Puebla*.
- Allonrobots. (2013). Recuperado el 18 de Octubre de 2015, de <http://www.allonrobots.com/leonardo-da-vinci.html>
- Bingtuan Gao, J. X. (2011). A humanoid neck system Featuring low motion noise. *Springer*.
- Cortés, F. R. (2011). *Robótica: control de robots manipuladores* (Primera ed.). Alfaomega.
- Francesco Nori, L. J. (2007). Accurate control of a human-like tendon-driven neck. *IEEE*(978-1-4244-1862).
- Frank H. Netter, M. (2014). *Atlas de anatomía humana* (sexta ed.). Elsevier Masson.
- History of information*. (s.f.). Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de <http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=3570>
- Honda*. (s.f.). Recuperado el Octubre de 2015, de <http://world.honda.com/ASIMO/history/>
- La Nacion*. (15 de Abril de 2015). Recuperado el Noviembre de 2015, de <http://www.lanacion.com.ar/1786374-desarrollan-un-expresivo-robot-que-responde-a-gestos-humanos>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderno* . Pearson .
- Rob Reilink, L. C. (2011). Mechatronic design of the Twete humanoid head. *Springer*.
- Technology, M. I. (s.f.). *MIT Proyects*. (MIT) Recuperado el Noviembre de 2015, de <http://www.ai.mit.edu/projects/sociable/kismet.html>
- Technology, M. I. (s.f.). *News Magazine MIT*. (MIT) Recuperado el Noviembre de 2015, de <http://news.mit.edu//2008/techtalk52-23.pdf>
- Valencia, L. R. (2008). Sistemas dinámicos. *Departamento de Física, Universidad de Chile*.

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**

