

## Diseño y simulación de un brazo de robot con músculos artificiales de McKibben utilizando CAD

DÍAZ, Sergio\*†, GUTIÉRREZ, Cithalih, GONZÁLEZ, Julio y MEZA, José

Recibido Enero 5, 2017; Aceptado Marzo 20, 2017

### Resumen

El hombre siempre ha buscado la manera de automatizar tareas repetitivas, ya sea para acelerar procesos o para evitar accidentes, sin embargo hasta el momento existen pocas herramientas de robótica con la flexibilidad y movimientos miméticos tan precisos al del humano. Actualmente, las Instituciones de Educación Superior públicas, no cuentan con el equipo suficiente, para el desarrollo de prácticas que permitan maximizar el trabajo, en asignaturas como la robótica; éste artículo presenta el diseño y modelo de un prototipo virtual, de un brazo de robot de 5 GDL con músculos artificiales, basados en el modelo de McKibben con técnicas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) emulando los movimientos de un brazo físico. La metodología de base en esta investigación, se constituye del método científico, combinado con modelos de ciclo de vida de Ingeniería de Software (cascada e incremental). Entre los resultados obtenidos, se comprueba que el prototipo virtual responde a los movimientos de un brazo natural, con un error de 0°. La principal aportación es el diseño del prototipo virtual del brazo de robot que permite la interacción máquina-estudiante para impulsar el desarrollo de la creatividad del alumno, aplicando sus conocimientos teóricos de control y robótica, adquiridos en clase.

### Prototipo virtual, músculo de McKibben, CAD

**Citación:** DÍAZ, Sergio, GUTIÉRREZ, Cithalih, GONZÁLEZ, Julio y MEZA, José. Diseño y simulación de un brazo de robot con músculos artificiales de McKibben utilizando CAD. Revista de Ingeniería Mecánica 2017, 1-1: 1-9

### Abstract

In Throughout history, man has always sought to automate repetitive tasks, either to accelerate processes or to avoid accidents, however so far there are few robotic tools with the flexibility and man's accurate mimetics motions. Currently, public higher education institutions do not have the necessary equipment to develop practices that maximize work, in subjects such as robotics; this paper presents the design and model of a virtual prototype of a 5 DOF robot arm with artificial muscles, based on the McKibben model, using Computer Assisted Design (CAD) techniques, physical arm's emulating motions. The basic methodology in this research, is constituted of the scientific method, combined with life cycle models of Software Engineering (cascade and incremental). Among the results obtained, it is verified that the virtual prototype responds to the motions of a natural arm, with a 0° error. The main contribution is the design of the virtual prototype of the robot arm that allows the student-machine interaction to boost the development of the student's creativity, applying his theoretical knowledge of control and robotics, acquired in class.

### Virtual prototype, McKibben muscle, CAD

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: sergio\_diazz@yahoo.fr)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En los seres humanos, las extremidades son parte esencial en la realización de tareas, en especial los brazos en conjunto con las manos, forman una de las herramientas más importantes que ha tenido el hombre, pues le proveen un medio eficaz para interactuar con distintos objetos, es claro que sin éstos habría sido difícil evolucionar de la forma en que se ha hecho.

Con base a lo anterior, el hombre ha intentado imitar el funcionamiento de los brazos e implementarlo de forma mecánica, así ha construido distintos mecanismos que le facilitan la realización de tareas peligrosas o repetitivas. Entre ellos robots manipuladores de los que destacan brazos robóticos por su amplio uso en la industria y más recientemente en la ayuda a personas con la falta de algún miembro.

Actualmente en México, existe poca investigación en el desarrollo de software de simulación para el control de brazos de robot con músculos artificiales neumáticos basados en el modelo de McKibben, aplicados a la enseñanza educativa, para reforzar la teoría aprendida en las aulas, permitiendo al estudiante adquirir conceptos y habilidades para la manipulación de un robot, comprender su funcionamiento y detectar las fallas para tener una preparación y lograr las competencias que le permitan solucionar un problema real de un sistema dinámico, que se le presenten en el ámbito laboral.

En México, no todas las instituciones de educación superior públicas, cuentan con recursos humanos, ni equipos suficientes para atender la demanda de estudiantes en la formación de nuevos ingenieros y/o investigadores.

Los principales problemas que presentan las instituciones de nivel superior en materia de prácticas de laboratorio son: La carencia de equipo por limitaciones económicas, horarios restringidos para realizar las prácticas (dada la carencia de personal y espacio en el laboratorio durante las horas de atención), los equipos de robótica y aplicaciones de control empleando TIC's.

Las escuelas que cuentan con equipo para el desarrollo de prácticas de robótica, o equipos comerciales didácticos para este tipo de actividades, tiene el inconveniente de contar con sistemas estáticos, difícil de aplicar los diferentes tipos de control, por consecuencia limitando la creatividad del estudiante.

Derivado de lo anterior, en este trabajo se plantea una alternativa como una herramienta de apoyo, para aplicar diferentes tipos de control en una simulación de un sistema dinámico, caso de uso un brazo de robot que emplea músculos artificiales neumáticos basados en el modelo de McKibben, integrando software CAD, Blender y Python, para reforzar los conocimientos teóricos.

A continuación se mencionan algunos de los términos que se utilizaran en el presente trabajo:

Prototipo virtual. Según Gowda et al. de la universidad del estado de Michigan, un prototipo virtual es una tecnología que implica el uso de realidad virtual y otras tecnología informáticas para crear prototipos digitales [1], en este caso se utiliza para representar un producto físico a escala de un brazo de robot, con movimientos similares.

Músculo de McKibben. Según B. Tondu y P. López entre otros investigadores, en los años 50's surgido de la necesidad de crear una ortopedia como una herramienta para sustituir a un brazo que permitiera abrir y cerrar los dedos, el físico Joseph L. McKibben inventó uno de los primeros actuadores con músculos neumático, al cual denominó músculo artificial neumático de McKibben en su honor [2]. El músculo artificial neumático está integrado por: un tubo de caucho interno cubierto por una capa de fibras trenzadas de forma helicoidal, en un extremo tiene un orificio para la entrada de aire y cerrado en el otro.

El principio de funcionamiento es el siguiente: cuando en el tubo interior entra aire, se genera una fuerza radial y longitudinal, que al aumentar la presión, el músculo se hincha y se contrae, y al liberar el aire, el músculo vuelve a su posición original, mimetizando al músculo esquelético del ser humano [2].

Brazo de robot. Un brazo de robot o manipulador se define como un conjunto de elementos electromecánicos que originan el movimiento de un elemento terminal (herramienta o gripper) [3,4].

CAD. Diseño Asistido por Computadora es una herramienta, que permite hacer dibujos bidimensionales y modelos tridimensionales de forma precisa mediante el uso de una computadora. El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño [5,6].

### Trabajos previos

Actualmente los sistemas de simulación empleando tecnología TIC's, y los laboratorios virtuales, han sido una ayuda como herramienta de apoyo en la educación, especialmente para reforzar las materias donde las prácticas son esenciales para el desarrollo de habilidades de los alumnos en la solución de problemas. A continuación se presentan algunos trabajos similares al desarrollado en este trabajo de Investigación:

Aguirre Cerrillo et al. en su trabajo de investigación titulado "Brazo Robótico Actuado por Músculos Neumático", presentan la construcción de un brazo robótico de 2 grados de libertad para ser usado como prototipo de equipo didáctico. En esta investigación, se describe el funcionamiento de los actuadores utilizados, empleando músculos neumáticos. Presenta la construcción del prototipo y la forma en que realiza los movimientos, flexión y extensión, el análisis de las articulaciones, la del hombro y del codo, simulando los movimientos del espacio de trabajo; el músculo neumático es controlado por medio de válvulas neumáticas proporcionales. El sistema de control es por retroalimentación y se utiliza un control del tipo PID, todo se basa en el diseño y control físico, pero no de la simulación del control en los músculos de McKibben, sino del conjunto de las 2 articulaciones [7].

Infante Jiménez, en su propuesta de investigación denominada "propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas", analiza las ventajas y desventajas del empleo de laboratorios virtuales como una herramienta complementaria para las asignaturas teórico-prácticas.

Con el resultado de este análisis, se elaboró una propuesta de implementación, integrando la simulación en un ambiente de aprendizaje, llamado blended learning (b-learning), en este sistema combina actividades presenciales con virtuales, derivando conocimiento por auto-aprendizaje y trabajo colaborativo. Este sistema representó un recurso potencial y de gran ayuda para los docentes [8].

Bajo este mismo tenor Pedro López y Hugo Andrade, en su trabajo de investigación denominado “aprendizaje con robótica, algunas experiencias”, presenta un análisis de diferentes trabajos de investigación acerca de la implementación de la robótica en la educación, con el motivo de tener una base o un patrón para el diseño de una propuesta de una herramienta de apoyo para el aprendizaje de la robótica en la educación básica y media superior, específicamente secundaria y bachillerato. Para ello considera 2 características importantes de la robótica en la educación, la primera es con base a los conocimientos de conceptos de subsistemas que presenta un robot, para enseguida la construcción de un prototipo del mismo, el objetivo de éste ámbito del alumno es el desarrollo de competencias para comprender los conceptos y la construcción de diferentes tipos de robot. La segunda característica de aplicación de la robótica cuyo objetivo es la motivación y el conocimiento de diferentes áreas inmersas en un robot, desarrollando habilidades y competencias en los estudiantes [9].

Finalmente Familia Rina en su investigación titulada “evaluación de herramientas para la experimentación ubicua en el aprendizaje de robótica y mecatrónica”, presenta una síntesis de los resultados obtenidos en el proceso de la evaluación de actividades de aprendizaje de robótica y mecatrónica, haciendo énfasis en las estrategias de los sistemas ubicuos (virtual y de acceso remoto), que vaya más allá de la simple utilización vía internet, de herramientas para la simulación y emulación de equipos, hasta la posibilidad de activación, monitoreo remoto de dichos equipos, de la estructura física donde estén alojados, y su uso de manera compartida y colaborativa entre los estudiantes [10].

La mayoría de los trabajos de investigación encontrados se basan en sistemas o laboratorios virtuales a distancia, pero hasta el momento no se ha relacionado alguno, incluyendo simulación y control de un brazo de robot con músculos artificiales basados en el modelo de McKibben, como una herramienta para aplicar diferentes tipos de control y empleando conocimientos de robótica.

En conclusión, algunos de los trabajos encontrados mencionados en esta sección, han permitido hasta el momento generar información que integra varios aspectos como el diseño, desarrollo, funcionamiento de un brazo de robot y la aplicación de la robótica en la educación. Es importante señalar que una vez realizada la búsqueda del estado del arte, no se encontraron documentos, que consideren la simulación y el control de un brazo de robot con músculos artificiales de McKibben, integrando CAD, Blender y Python, en la simulación, y control para reforzar la teoría de las materias de robótica.

Por otra parte, en el mercado existen distintas herramientas CAD y software de simulación que permiten el modelado 3D utilizados principalmente en el área de animación, diseño gráfico, desarrollo de videojuegos entre otras aplicaciones. Los software más reconocidos y más utilizados en las áreas mencionadas son los siguientes [11]: Maya, SoftImage, 3D StudioMax, LightWaveBlender, y Cinema 4D, entre otros. Se identificaron las ventajas y desventajas de cada uno considerando algunas características óptimas para este proyecto como son: precio, tiempo requerido para su aprendizaje, scripting, herramientas de modelado, cinemática inversa, técnicas de animación, soporte para cuerpos rígidos y cuerpos blandos, y simulación de fluidos entre otras. También se buscó una herramienta que fuese compatible en formatos con SolidWorks pues esta herramienta sería usada en el modelado de las piezas para una mayor facilidad, encontrando similitudes entre los distintos software analizados. Además de la posibilidad de manipular los objetos 3D por medio de programación para lograr una simulación más robusta, teniendo en mente que los modelos de control se realizarán con blender y python. Para ello se hizo una comparación entre los software más usados en el área.

### Desarrollo de la propuesta

El método empleado para el desarrollo del proyecto fue método científico, combinado con modelos de ciclo de vida de Ingeniería de Software, como: cascada e incremental. Se realizaron 3 incrementos, diseño y desarrollo del prototipo virtual, desarrollo de la programación y la integración de todo el sistema de simulación.

*1<sup>er</sup> Incremento.* Para el primer incremento se planteó el siguiente modelo de desarrollo, presentado en la figura 1, compuesto de 3 incrementos.



Figura 1 Modelo para el desarrollo del trabajo

### Análisis del modelo

En esta etapa se tomaron en cuenta las características del brazo de robot como dimensiones, grados de libertad, textura, y materiales. El proceso de modelado involucra distintas técnicas propias del uso del software Blender y SolidWorks en general del campo de la animación 3D y de CAD respectivamente, para la realización de este análisis se utilizó las etapas del procesos de modelado 3D mostrado en la figura 2.



Figura 2 Proceso de modelado de 3D

Para modelar las piezas se hizo uso de Blender como herramienta Base y de SolidWorks en algunas piezas que posteriormente fueron importadas a Blender.

Blender cuenta con un conjunto de herramientas que se utilizaron para el modelado y ensamblado final del modelo virtual. Entre ellos la propia interfaz de Blender pues posee gran funcionalidad en si misma por la versatilidad que otorga. Así es posible realizar modelos en 3D, dotarlos de color, textura, animarlos y renderizarlos entre otras funciones.

La estructura del brazo de robot se constituye de 5 grado de libertad, con pinza o gripper como elemento terminal, y se utilizó Solidworks como CAD, Blender y python para el control del modelo virtual, que fue el prototipo de un brazo de robot con músculos de McKibben.

Para modelar se utilizó SolidWorks como la herramienta de modelado principal y se importaron los archivos con las extensiones STL o VRML (compatibles) a Blender, como se muestra en la figura 3. En seguida es la creación de vértices, esta es una fase crítica en el proceso de modelado, consiste en separar con precisión los vértices correspondientes a cada parte del brazo, para su posterior manipulación con el objetivo de lograr movimientos independientes, y que no se arrastren vértices que no pertenezcan a dicha pieza, ocasionando distorsiones en el modelo virtual. Para ello se crean grupos de vértices, y en el modelo se seleccionan los vértices pertenecientes al grupo correspondiente.

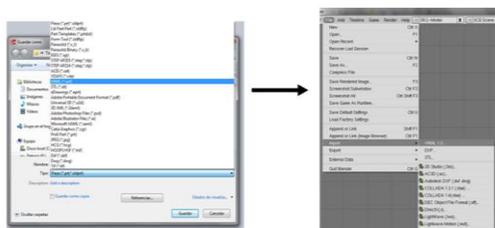


Figura 3 Importación de pieza SolidWorks a Blender

En la figura 4, se muestra la asignación de material, característica de Blender con la cual se cambia la apariencia del modelo para obtener rasgos más reales, puede ser una textura de metal, madera, plástico etc.

Modelo listo para utilizar una técnica de animación, ya sea para obtener un fotograma, render del modelo virtual o dar pie a la manipulación del modelo mediante programación, en este caso en el lenguaje de programación Python, herramienta de software de forma nativa como scripting, teniendo de esta forma una gran flexibilidad y potencia que no es posible obtener en software CAD.



Figura 4 Modelado del prototipo virtual

2º Incremento, para el segundo incremento se comenzó con la animación y la programación del prototipo virtual.

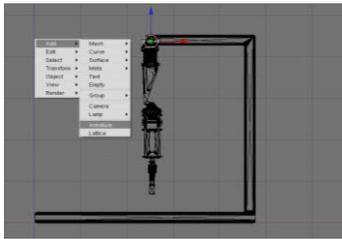
### Animación

Una vez que se finalizó con el modelado del brazo de robot se comenzó con la fase de animación, para esto se utilizó el proceso de animación mostrado en la figura 5.



Figura 5 Proceso de animación

En Blender para realizar movimientos sobre un modelo virtual, es necesario crear un esqueleto similar al cuerpo humano en el que se tiene músculos y piel, internamente se cuenta con un esqueleto formado de huesos con articulaciones que nos proporcionan movilidad, como se muestra en la figura 6; este conjunto de elementos es llamado armadura y se realiza por medio de la creación y estructuración de hueso.



**Figura 6** Creación de armadura

Una vez creada la armadura, es necesario emparentar cada uno de los huesos con una parte del brazo de robot, para de esta forma facilitar la manipulación de los movimientos, pues en realidad se estaría moviendo el esqueleto y arrastraría a la pieza del modelo que le corresponde, de esta forma solo se manipula el hueso y no todos los vértices, ni caras que conforman dicha pieza.

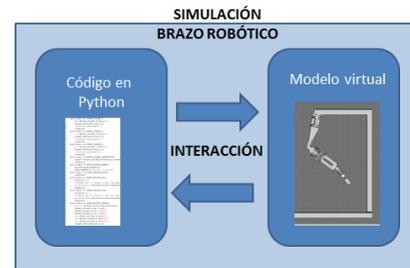
### Programación

Para controlar los movimientos del brazo de robot se realizó una interfaz gráfica que permite ingresar parámetros de movimiento como son: articulación a mover, ángulo, y distancia entre otros, para lograr una ágil manipulación del modelo 3D y de esta forma realizar las pruebas necesarias. Para esta tarea se utilizó como lenguaje de programación Python ya que se integra nativamente con Blender, sin embargo se deja abierta la posibilidad a utilizar el modelo 3D en algún otro lenguaje de programación o software de simulación como Microsoft Robotics.

3er Incremento, En esta etapa se integró el modelo virtual y la interface de control de movimientos del brazo de robot.

Una vez que se programó el código de interfaz gráfica de control del modelo del brazo robótico, así como los distintos módulos que permiten el movimiento de las partes del manipulador.

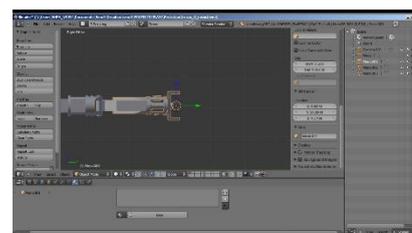
Finalmente se realizó la integración del proyecto entre las interface gráfica de datos, y el prototipo virtual del brazo de robot con músculos de McKibben como se muestra en la figura 7, con este sistema, el alumno podrá tener acceso tanto al software como al hardware para poder modificarlo, de acuerdo a las necesidades de la materia de robótica, para programar su control.



**Figura 7** Esquema de integración de la simulación

### Resultados

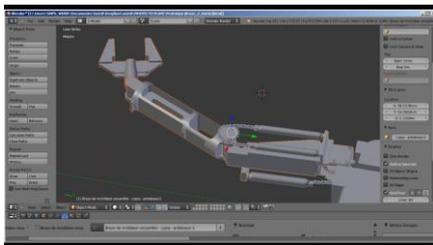
Los primeros resultados obtenidos en este trabajo de investigación fueron los esperados, primero porque se cumplió el objetivo de diseñar y desarrollar un sistema para la simulación y el control de un prototipo virtual de un brazo de robot de 5 GDL, con músculos artificiales de McKibben desarrollado en CAD, Blender y Python. Segundo por desarrollar un sistema de control con arquitectura abierta que le permitiera al alumno desarrollar prácticas, donde pudiera programar su propio control, agregar un nuevo hardware o sustituir el que se utilizó en éste trabajo, sin la limitante de una arquitectura cerrada, que le impidiera hacer modificaciones, limitándole su creatividad.



**Figura 8** Interface de solidworks y Blender

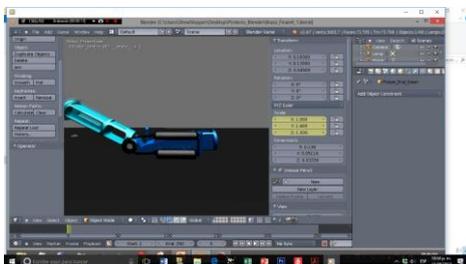
En la figura 8 se muestra la simulación del prototipo de brazo de robot con músculos artificiales de McKibben en la interfaz gráfica de Blender y programada con Python para los movimientos de las articulaciones.

Otro resultado importante, fue el acoplamiento entre solidworks, Blender y Python, para la manipulación del brazo de robot con músculos de McKibben ensamblando todos los segmentos y moviéndose de acuerdo a la variación de la longitud de los músculos artificiales al ser inflados y contraídos por la fuerza radial y longitudinal, como se observa en la figura 9 al mover el antebrazo.



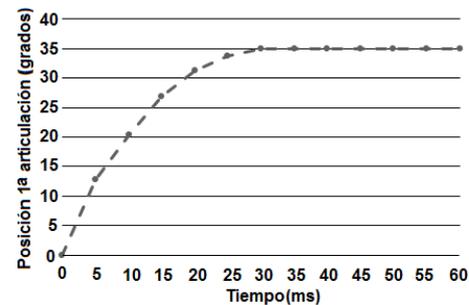
**Figura 9** Manipulación del robot desde la interfaz

Finalmente se realizaron pruebas de todo el sistema para medir el tiempo de respuesta de los movimientos de prototipo del brazo de robot virtual, mostrado en la figura 10, con condiciones del control de manera ideal, es decir sin condiciones reales del músculo artificial neumático de McKibben.



**Figura 10** Manipulación del robot desde la interfaz

En la figura 11 se puede observar el resultado del tiempo de respuesta de la articulación 1 del brazo de robot para llegar al ángulo consigna de  $35^\circ$ , el tiempo de la simulación fue de 30 ms (línea punteada), con un error de  $0^\circ$ .



**Figura 11** Tiempo de respuesta de la articulación 1

## Conclusiones

Se puede concluir que se cumplió el objetivo de obtener un diseño de un sistema de simulación de un prototipo con un brazo de robot de músculos artificiales de McKibben mimetizando los movimientos de un brazo humano, utilizando la integración Solidworks, Blender y Python.

Por otra parte se pudo comprobar que debido a que se trata de un prototipo virtual, el control de movimiento tuvo resultados ideales, con errores de posición igual a cero, es decir que la variación entre la posición consigna y la del prototipo no hubo error. Por otra parte ya se trabaja para insertar condiciones reales a partir de un brazo de robot con músculos artificiales neumáticos basados en el modelo de McKibben usando su función de transferencia, al mismo tiempo se desarrolla un prototipo físico con características similares.

Finalmente ya se encuentra trabajando sobre una interfaz Blender, Python y Labview, como una herramienta de apoyo para realizar prácticas de laboratorio de robótica y control en tiempo real con un brazo de 5 GDL con músculos artificiales de McKibben.

**Referencias**

Gowda, S., Jayaram, S., and Jayaram, U., 1999, "Architectures for Internet-based Collaborative Virtual Prototyping," Proceedings of the 1999 ASME Design Technical Conference and Computers in Engineering Conference, DETC99/CIE-9040, Las Vegas, Nevada, September 11-15.

B. Tondu, V. Boitier, and P. Lopez. Naturally compliant robot-arms actuated by McKibben artificial muscles. In Proc. IEEE Int. conf. on Systems, Man, and Cybernetics, volume 3, pages 2635–2640, 1994

Mendonza Sánchez Eduardo Augusto, "Control de un Robot Manipulador", Tesis Profesional, Marzo 2004, Universidad de las Américas, Puebla. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/mendoza\\_s\\_ea/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendoza_s_ea/capitulo2.pdf)

González Víctor R, Centro de Formación del Profesorado e Innovación Educativa Valladolid II, "Curso 2007: Fundamentos de Robótica", Valladolid, España. Disponible en: [http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl\\_robotica/sistema/morfologia.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_robotica/sistema/morfologia.htm)

Duggal Vijay, "CADD Primer", A general guide to computer aided design and drafting CADD, CAD, CADD Primer Education, EU, Oct. 2001 issue.

Rojas Lazo Oswaldo, Rojas Luis, "Diseño asistido por computador", Portal Revistas Peruanas, Perú, 2006.

Aguirre Carrillo Fabio, "Brazo robótico actuado por músculos neumáticos", 10° Congreso Nacional Mecatrónica, Noviembre de 2011, Puerto Vallarta Jalisco México. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Instituto Tecnológico de Puerto Vallarta.

Infante Jiménez Cherlys, "Propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas", Revista mexicana de investigación educativa, vol. 19 número 62, julio-septiembre de 2014, pp. 917-937, ISSN: 1405-6666, México.

López Ramírez Pedro y Andrade Sosa Hugo "Aprendizaje con robótica, algunas experiencias". Revista Educación, vol. 37, núm. 1, enero-junio 2013, pp. 43-63 Universidad de Costa Rica San Pedro, Montes de Oca, ISSN: 0379-7082, Costa Rica.

Rina Familia, "Evaluación de Herramientas para la Experimentación Ubicua en el Aprendizaje de Robótica y Mecatrónica", Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana.

Benoit saint-Moulin, The 3D Software comparison (Marzo 2011), [http://www.tdt3.com/articles\\_viewer.php?art\\_id=99](http://www.tdt3.com/articles_viewer.php?art_id=99) (artículo).

Arduino. (2016). ARDUINO. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>.