

Etapas en la construcción de un robot móvil con sistema de sensado y comunicación Mobile robot construction stages with a sensing and communication system

L. N. Oliva-Moreno ^{a,*}, M. E. Gómez-Mayorga ^a, C. M. Vicario-Solórzano ^b

^a Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

^b Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Instituto Politécnico Nacional, 08400, Iztacalco, CDMX, México.

Resumen

La cuarta revolución industrial conlleva cambios sociales, materiales y tecnológicos; la digitalización, internet y gran diversidad y cantidad de información. Está en la forma de comunicarnos, de relacionarnos, de trabajar, no solo físicamente, ni en días hábiles o en horarios determinados; en el ámbito educativo, se están adecuando contenidos basados en competencias y metodologías activas; se están incorporando materiales específicos, en plataformas y aplicaciones móviles, de cursos, diplomados, especialidades y posgrados, presenciales y virtuales, para acercarse a más territorios, nacionales e internacionales, en todos los niveles educativos. El presente trabajo, apegándose a la industria 4.0, muestra el desarrollo para construir un robot móvil con sistemas de sensado y comunicación y algoritmos basados en sistemas complejos para experimentar con el trabajo colaborativo; puesto que la robótica educativa es un medio facilitador y atractivo en el aprendizaje, que estimula la creatividad y actividades individuales y colaborativas, este prototipo puede ser útil en la enseñanza de entes activos.

Palabras Clave: Desarrollo electrónico, Enjambre de robots, Robot móvil, Sistema embebido, Software de control.

Abstract

The fourth industrial revolution entails social, material and technological changes; digitization, internet and great diversity and amount of information. It is in the way we communicate, relate, work, not only physically, nor on business days or at certain times; in the educational field, content based on active competencies and methodologies is being adapted; Specific materials are being incorporated, on mobile platforms and applications, for courses, graduates, specialties and postgraduate courses, face to face and virtual, to approach more territories, national and international, at all educational levels. This work, sticking to industry 4.0, shows the development to build a mobile robot with sensing and communication systems and algorithms based on complex systems, to experiment with collaborative work; since educational robotics is a facilitating and attractive means of learning, which simulates creativity and individual and collaborative activities, this prototype can be useful in teaching active entities.

Keywords: Electronic development, Swarm of robots, Mobile robot, Embedded system, Control software.

1. Introducción

Con la digitalización y la conectividad en nuestras vidas, estamos experimentando cambios significativos, ya no solo adquirimos productos automatizados, sino que nos relacionamos con ellos al usar la tecnología de la comunicación y de la información, de esta manera nuestros gustos y necesidades retroalimentan el mercado de consumo, que en forma remota y multidireccional decide y nos ofrece información de cosas que quizá requeriremos más adelante, facilitándonos el acceso y haciendo atractiva la adquisición al reducir costos, tiempos y distancias (Basco & Beliz, 2018). Tanto en la industria como en la educación el uso de robots está en aumento, en la primera porque facilitan los trabajos de

carga pesada, la manufactura repetitiva, largas horas de trabajo, mayor producción a menor costo, conexiones remotas o el control en plataformas digitales; en la segunda porque facilita el aprendizaje didáctico, fomenta la participación por ser una herramienta atractiva, potencia la creatividad, motiva, da un acercamiento tecnológico y genera interés en diferentes áreas del conocimiento.

Es el guía, instructor o usuario quien adecua al robot con contenidos, problemas, ejercicios o rutinas para experimentar, aprender o enseñar, pudiendo facilitar o dar acompañamiento a otros que se interesen y participen, por lo que hay motivación y de esa forma se construye conocimiento propio.

Aunque la tecnología avanza, no siempre se tiene la posibilidad de adquirir kits robóticos, si es para uso en las

*Autor para la correspondencia: loliva@ipn.mx

Correo electrónico: loliva@ipn.mx (Luz Noé Oliva Moreno), mgomez@ipn.mx (Margarita Elizabeth Gómez Mayorga), cvicario@ipn.mx (Claudia Marina Vicario Solórzano).

Historial del manuscrito: recibido el 28/06/2023, última versión-revisada recibida el 05/09/2023, aceptado el 01/09/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11357>



aulas, una forma de trabajar con ellos es desarrollándolos, siendo esto parte del aprendizaje, crear robots por etapas, haciendo uso de conocimientos cognitivos, metacognitivos y aprendiendo por experimentación, además de promover el uso de diversas TIC o tutorías en entornos virtuales (Bravo-Sánchez & Forero-Guzmán, 2012, Ruiz-Velasco-Sánchez, 2007, Camacho Marín et al., 2020).

La robótica en la educación tiene un enorme campo aplicativo que promueve el aprendizaje activo en los estudiantes, sus tres roles son: uno, el programar un código para obtener una manifestación física, con prueba, error y observación, poniendo en práctica los conocimientos; dos, el robot como el centro de aprendizaje para simular en software, crear estrategias de solución o usar por su funcionalidad; tres, de acompañamiento, es decir, compañero, ayudante o complemento intelectual (Miller, D. et al., 2008). El uso de la robótica educativa permite el desarrollo de habilidades en pro del aprendizaje.

Los robots como herramienta para que el estudiante aprenda a construirlo, programarlo y que genere así nuevos prototipos, es un enfoque que desarrolla el pensamiento lógico-matemático, el algorítmico y habilidades de creatividad, trabajo colaborativo o comunicación, entre otras (González Fernández et al., 2021). Quizá por todas las cualidades anteriores es que se tiene un gran interés en su desarrollo y uso, pues los robots fomentan la dedicación en el aprendizaje.

Por otro lado, los sistemas complejos buscan implementar algoritmos en sistemas físicos como los robots, para observar su comportamiento y comprobar los resultados de simuladores; al tener más de un robot realizando la misma tarea, hablamos de un enjambre de robots (Marco Dorigo et al, 2021).

Ahora bien, los sistemas embebidos están enfocados al desarrollo especializado de sistemas electrónicos con una gran diversidad de aplicaciones; hacen referencia al control electrónico en sistemas integrados presentes en objetos, productos o dispositivos que usamos en el trabajo, en la escuela y en la casa; su funcionamiento se basa en un microprocesador que controla una o varias funciones a través de periféricos de entrada/salida, no está diseñado para que lo programe el usuario final (Heath, 2002); son un conjunto de componentes electrónicos que realizan funciones dedicadas, reciben, analizan y procesan datos (Alva & Alcorta, 2020); consisten en una unidad de procesamiento, una memoria y dispositivos periféricos a la medida; su objetivo es resolver una tarea en particular, a diferencia de un sistema general como lo sería una PC.

Ejemplo de lo anterior es que el usuario puede identificar y usar el hardware del robot móvil, programar el microcontrolador para usar los periféricos, pero no puede cambiar su arquitectura.

Como el robot móvil contiene un microcontrolador como unidad de procesamiento, memoria, dispositivos periféricos y una tarjeta de circuito impreso desarrollada a la medida, se puede considerar como un sistema embebido.

2. Etapas de construcción

Las etapas de construcción de un robot móvil son las siguientes: requerimientos, es decir, las características de lo que se quiere realizar; arquitectura, cantidad y tipo de componentes; análisis y selección de los materiales; diseño del esquemático para describir el circuito y el diseño de la tarjeta

para la planificación de los componentes y las dimensiones; fabricación y construcción. A continuación se describen las mismas.

2.1. Requerimientos

La primera etapa para la construcción consiste en definir los requisitos de lo que se quiere hacer, el cómo se hará y el escenario de quién lo usará o dónde se utilizará. Para ello se debe hacer un levantamiento de dichos requisitos con las necesidades del usuario, que puede ser mediante una entrevista, un prototipado, un análisis de interfaces, casos de uso, un análisis de documentos, escenarios u otros (Gómez-Fuentes, 2011, Brace, W. et al., 2011, Medina-Cruz et al., 2019), que lleven al entendimiento entre el diseñador y el usuario del producto final, en este caso un robot móvil.

Una vez conociendo lo que el usuario requiere, se hace un análisis de productos similares en el mercado, para ejemplificar ver en la tabla 1 el resumen de las características más relevantes de un robot móvil desarrollado, entre ellas: el funcionamiento, las dimensiones y las condiciones de operación.

Tabla 1: Requerimientos para el robot móvil

Requerimientos del robot	Especificaciones	Valores y unidades
Seguidor de línea negra o blanca	Distancia del sensor a la línea	1 – 5 mm
Detectar objetos frontales	Distancia de robot al objeto	5 – 80 cm
Detección de objetos frontales amplia	Ángulo de apertura	$\pm 45^\circ$
Evitar caídas por bordes de la superficie	Detectar los bordes (altura)	5 cm
Rotación completa sobre su eje	Ángulo de giros	360°
Control de velocidad	Velocidad mínima y máxima	1 – 15 cm/s
Comunicación inalámbrica Bluetooth	Distancia máxima	8 metros
Comunicación alámbrica	Conector USB	NA
Medición del desplazamiento del robot	Lectura mínima del giro de la rueda	45°
Comunicación mediante la tarjeta secundaria	Número de tarjetas	1
Dimensión	Tamaño, longitud y ancho	15 x 15 cm

2.2. Arquitectura

La segunda etapa es hacer un análisis con los requerimientos de la tabla 1 para proponer la arquitectura del robot móvil, es decir, seleccionar el tipo y la cantidad de componentes, ver figura 1 con los datos elegidos del ejemplo.

En la figura 1 se agrupan tanto la cantidad como los componentes necesarios, cuya descripción es la siguiente:

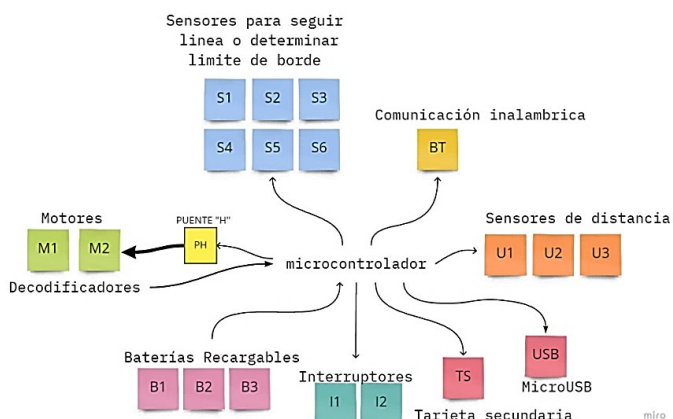


Figura 1: Diagrama de bloques del robot móvil (Miro, 2019)

cubren los requerimientos necesarios y por último analizar y determinar los adecuados.

En el análisis pueden encontrarse varios componentes con la misma funcionalidad, pero con una diferencia de precio considerable, mayores o menores rangos de precisión, diferentes características en las mediciones, o que requieran habilidades previas de los usuarios. De ahí la importancia de considerarse dicho análisis para cubrir el costo beneficio.

Como ejemplo, para seleccionar los sensores con la funcionalidad de seguidor de línea, se hace una búsqueda en internet donde se encuentran opciones de dispositivos en imágenes, en texto, con nombres y con matrícula, estos datos se buscan en páginas específicas, para obtener sus características y analizarse para determinar el que se usará.

Para los componentes que se eligieron y que cumplen con la tabla 1 y la figura 1, ver la tabla 2. La columna Terminales indica cuantos pines de cada dispositivo se conectan con el microcontrolador, el resto se conecta a la alimentación. Siguiendo con el ejemplo, cada sensor ultrasónico tiene cuatro terminales, dos de ellas se conectan al microcontrolador y las otras dos a la alimentación.

Un puente H, conocido como driver, es quien da la energía necesaria a los motores para funcionar; la movilidad del robot es a través de ruedas, con las que puede avanzar, retroceder, girar y detenerse.

Las señales de control al puente H las manda el microcontrolador.

Los seis sensores reflectivos por infrarrojo, permiten hacer, a la vez, el seguimiento de línea o la detección de bordes en superficies, para no caer, esto es, a partir de detectar diferencias de intensidad de las superficies, es decir, claras u oscuras; en caso de no detectar una reflexión de luz infrarroja, implica que la superficie es totalmente negra o que hay una separación de la superficie hacia el sensor por la que transita el robot móvil.

La comunicación inalámbrica se realizará mediante un módulo Bluetooth, del robot móvil hacia un dispositivo móvil.

Los sensores de distancia permiten detectar objetos que se encuentran en la parte frontal del robot móvil.

El conector micro USB permite la comunicación entre el microcontrolador con una computadora externa, para realizar una programación de forma alámbrica.

Con el conector de la tarjeta secundaria se hace la integración de un segundo microcontrolador, ya que interconecta los protocolos de comunicación serial y la alimentación de la tarjeta secundaria, trabajando de forma colaborativa las funciones de uno con las funciones del otro microcontrolador.

Los interruptores están conectados al microcontrolador para que éste realice hasta cuatro funciones diferentes, de acuerdo a la combinación de los switches (00, 01, 10, 11) y de la programación previamente cargada por el diseñador.

El robot móvil debe contar con baterías de alimentación, estándar y recargables para un uso sustentable.

2.3. Determinación de los componentes

La tercera etapa es determinar la especificación de cada componente que será usado, con base en los datos de necesidades mostrados en la tabla 1 y en los dispositivos mostrados en el diagrama de bloques de la figura 1. La selección implica invertir tiempo en las búsquedas constantes de los dispositivos disponibles en el mercado, enlistar los que

Tabla 2: Componentes seleccionados*

Dispositivo	Cantidad	Matrícula	Terminales
Sensor de distancia por ultrasonido	3	HC-SR04	2
Sensor reflectivo por infrarrojo	6	QRD1114	1
Motorreductor	2	Pololu 50:1	2
Módulo de comunicación Bluetooth	1	HC-05	2
Interruptor dual dipswitch	1	dipswitch	2
Conector micro-USB	1	Micro-USB-H	2
Batería recargable 1300 mAh	3	“AA”	-
Porta baterías lineal	1	Genérico	-
Conector de bits	1	90° de 40 terminales	2
LEDs indicadores	8	Rojo SMD (0805)	1
Puente H	1	TB6621FNG	3

Para determinar el microcontrolador, entre las consideraciones importantes para su selección están: por un lado, el número de terminales requeridas para conectar a todos los dispositivos, para que no falten, pudiendo sobrar; por otro lado, que contenga todos los puertos de conexión que se requieren. En el caso del robot móvil se requiere un puerto USB y 35 terminales. La suma total de la columna Terminales de la tabla 2, multiplicada por cada componente, da el total de terminales a conectar, el microcontrolador del robot móvil requiere 35 terminales como mínimo, por lo que deberá tener

* Nota. La información de la tabla el lector la puede consultar en internet, escribiendo el nombre y la matrícula.

35 o más terminales. Ver tabla 3 en la que se muestra una comparación de microcontroladores con características similares, siendo el de la columna derecha el que se determinó usar (PIC) en el robot móvil de la imagen 3.

Tabla 3: Comparativa de microcontroladores

	Arduin o UNO/ AVR	Arduin o Uno Clon/ Anime	Arduin o Mega	Makey Makey	PIC18F 4550T
Encapsulado	DIP 28	TQFP 32	TQFP 100	QFP 44	TQFP-44 SMD
Memoria	32Kb SRAM	32Kb	64K	32Kb	32KB flash
Ancho de bus	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits
Frecuencia de reloj	20M Hz	20M Hz	16M Hz	16M Hz	48K Hz
In/Out	23 I/O	23 I/O	54 I/O	26 I/O	35 I/O
RAM	2KB	2KB	8KB	2.5KB	2KB SRAM
Alimentación	1.8-5.5V	1.8-5.5V	4.5-5.5V	2.7-5.5V	2-5.5V
Marca	Microchip Technology / Atmel	Microchip Technology / Atmel	Microchip Technology / Atmel	Microchip Technology / Atmel	Microchip Technology
ROM	1KB EEP	1KB EEP	4KB EEP	1KB EEP	256 B EEP
Interfaz	I2C, SPI, USART	I2C, SPI, USART	I2C, SPI, USART, USB	I2C, SPI, USART, USB	EUSART, I2C, SPI, USB
ADC	6 canales	8 canales	16 canales	12 canales	13 canales
Temporizador	3	3	4	2	4
Precio	2.98 USD	2.89 USD	11 USD	5.5 USD	7.58 USD

El usuario debe realizar la búsqueda para determinar el microcontrolador que más le convenga en cuanto a su relación costo y beneficio.

2.4. Diseño del diagrama esquemático y de la tarjeta

La cuarta etapa es la elaboración de un diagrama esquemático mediante un software de diseño electrónico (Interaction Design Lab, 2019), con el que se tiene una representación de los componentes electrónicos en símbolos, sus conexiones eléctricas y las líneas de interconexión, ver figura 2, imágenes de arriba.

En la figura 2 se muestran: un sensor infrarrojo en A, un puerto digital de entrada/salida GPIO en B, un conector micro USB en C, dos resistores R1 y R2, la alimentación de 5 VCD, la tierra GND, las conexiones de datos GPIO D- y GPIO D+ de C y las líneas que los interconectan.

El sensor reflectivo A, tiene las conexiones eléctricas con un par de resistencias conectadas por un lado a 5V y, por otro lado, al sensor y a la salida B, que enviará un nivel de voltaje al microcontrolador a través de un puerto analógico disponible.

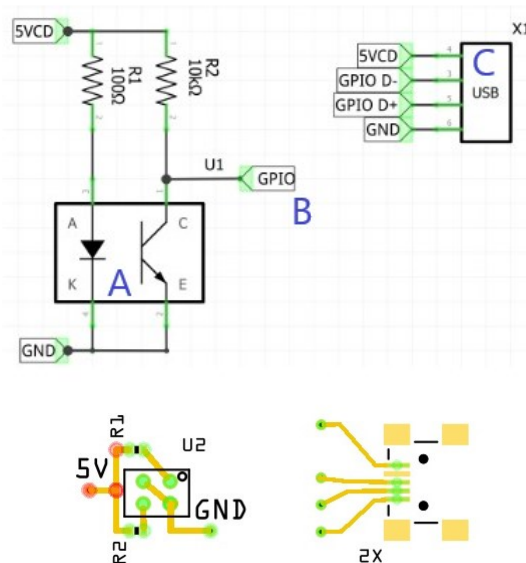


Figura 2: Diagrama esquemático y diseño de la tarjeta física

Una vez con el diagrama esquemático terminado, se genera el diseño de la tarjeta de circuito impreso con el mismo software del esquemático, que consiste en la planificación o representación de los componentes en tamaño real sobre la dimensión de la tarjeta. Y con el mismo software se realiza un autoruteo, ver figura 2, figuras de abajo, para obtener la representación de las pistas de cobre sobre la tarjeta, que conectarán físicamente a los componentes electrónicos en el diagrama esquemático elaborado previamente.

Al finalizar el autoruteo, se verifica la correcta conexión de las pistas del circuito, para posterior a ello generar los archivos Gerber, alrededor de siete, los cuales se utilizan para la fabricación de la tarjeta en la que se montarán los componentes.

Cada archivo Gerber representa un proceso de fabricación. También es importante imprimir el archivo. BOM que contiene la lista de los materiales que serán utilizados.

2.5. Construcción y pruebas

La quinta etapa consiste en montar y soldar en la tarjeta los componentes de la lista de los materiales, después armar el robot móvil, ver figura 3. Por último, se programa y se carga un código en el microcontrolador para verificar el funcionamiento.

Las pruebas a realizar se refieren a comprobar el funcionamiento de cada componente que conforma al robot final. En este caso, se verificó cada uno de los sensores y actuadores de la siguiente forma: mediante un programa de prueba se generan los valores digitales al puente H, de acuerdo con lo indicado en la hoja de especificaciones, para comprobar que los motores avanzan, se detienen y cambian de giro.

En el caso de los sensores de distancia, se genera un programa que produce un ancho de pulso de 10µs a una frecuencia de 40Khz y se obtiene del sensor un ancho de pulso visto a través de un osciloscopio, que representa la distancia a

la que está el objeto y que de acuerdo a la hoja de especificaciones se relaciona con la distancia en centímetros. Para el Bluetooth el programa de prueba utilizado es una aplicación ya desarrollada en Android que envía un valor lógico de “1” o de “0” y que se empareja con el módulo Bluetooth del robot haciendo que encienda y apague un LED en el robot, finalmente la prueba del sensor reflectivo se realiza con un programa que configura analógicamente su puerto de entrada y se define un umbral para indicar que hay o no reflexión de luz en el mismo.

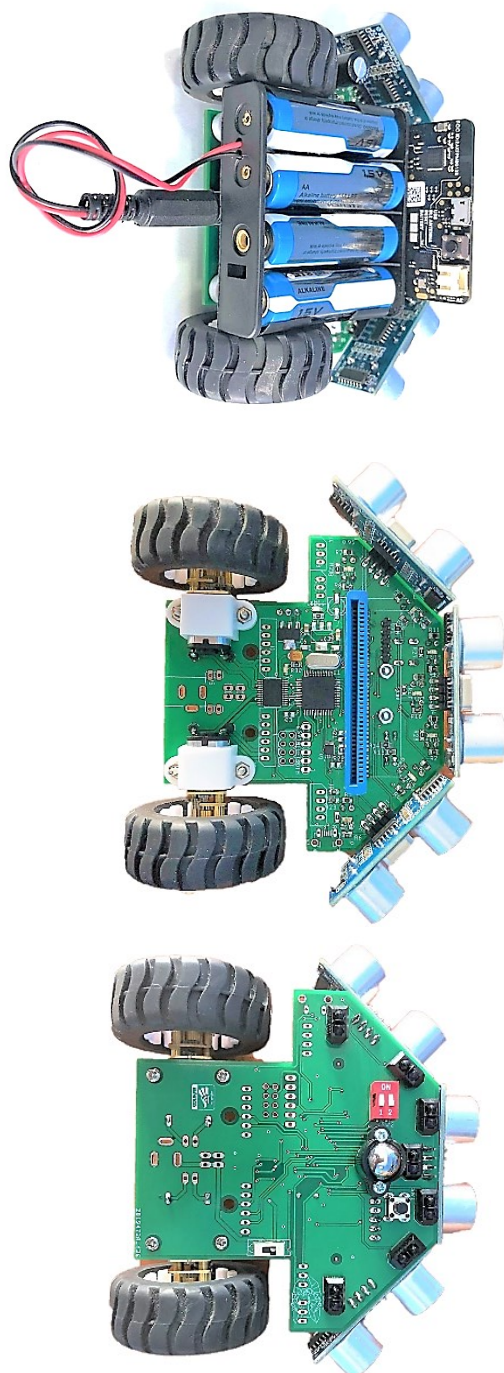


Figura 3: Construcción final

La programación se realiza mediante las herramientas de hardware (pickit) y Software (MPLAB) del microcontrolador

y pueden desarrollarse conforme a las habilidades, inventiva y creatividad del usuario.

3. Conclusiones

Para el diseño y la construcción del sistema embebido del robot móvil mostrado, se consideraron especificaciones de funcionalidad conforme a la complejidad de las tareas a desarrollar, la disponibilidad de componentes en el mercado, los costos y la normatividad aplicable al diseño de acuerdo con los estándares internacionales. Dichas especificaciones se refieren a la integración de microcontroladores, implementación de software para el control de periféricos u otros dispositivos de control como Dispositivos Lógicos Programables (DSP) y/o Arreglo de Compuertas Programables en Campo (FPGA), interfaces de sensores y actuadores de última generación.

En la actualidad es parte fundamental el desarrollo de tecnología, que puede impulsarse desde un nivel básico, desarrollando habilidades mediante la formalización, que en muchas ocasiones no se considera por contar con tecnología desarrollada en el extranjero y que limitan las habilidades en este campo de la robótica, y también pueden conducirnos a un desarrollo total de la tecnología. Los cambios serán graduales, pero depende de nosotros empezar mediante este tipo de trabajos.

La finalidad de este trabajo no se enfoca en la programación del robot móvil, sino en la experimentación de su desarrollo con base en etapas, desde la búsqueda de lo que se pretende hacer hasta la puesta en marcha.

Es posible entonces que varias personas desarrollen un robot, una por etapa, o una sola persona puede hacer todo el desarrollo. En cualquier caso el objetivo será el mismo, su utilidad y lo que conlleva en la enseñanza aprendizaje en una cuarta revolución industrial.

Referencias

- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero P. (2018). *Industria 4.0: Fabricando el futuro*. Unión Industrial Argentina, 41. DOI: 10.18235/0001229
- Bravo-Sánchez, F.A., & Forero-Guzmán, A. (2012). La robótica como recurso para facilitar el aprendizaje y desarrollo de competencias generales. *Teoría de la Educación: Educación en la Sociedad de la Información*, 13(2), 120-136. DOI: 10.14201/eks.9002
- Ruiz-Velasco-Sánchez, E. (2007). *Educatrónica Innovación en el Aprendizaje de las Ciencias y la Tecnología*. Ediciones Días de Santos. <https://bit.ly/3hDCf0d>
- Camacho Marín, R., Rivas Vallejo, C., Gaspar Castro, M., & Quiñonez Mendoza, C. (2020). Innovación y tecnología educativa en el contexto actual latinoamericano. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 26(1), 460-472.
- Miler, D.P., Nourbakhsh, I.R. & Siegwart, R. (2008). *Robots for Education*. In: Siciliano B., Khatib O. (eds). *Springer Handbook of Robotics*. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_56
- González Fernández, M. O., Flores González, Y. A., & Muñoz López, C. (2021). Panorama de la robótica educativa a favor del aprendizaje STEAM. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(2), 230101-230123. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i2.2301
- Marco Dorigo, Guy Theraulaz, Vito Trianni. (2021). *Swarm Robotics: Past, Present, and Future [Point of View]*. *Proceedings of the IEEE*. 109 (7), pp.1152-1165. (10.1109/JPROC.2021.3072740). (hal-03362874)
- Ying, T., & Zhong-Yang, Z. (2013). Research advance in swarm robotics. *Defence Technology*, 9, 18-39.

- DOI: 10.1016/j.dt.2013.03.001
Heath, S., (2002). What is an embedded system? Embedded systems design (pp. 1-14). EDN Series for design engineers.
DOI: 10.1016/B978-0-7506-5546-0.X5000-2
- Alva, J. L., & Alcorta, N. F. (2020). Sistemas Embebidos Guía metodológica para su desarrollo (1.ª ed., pp. 20–21). Urb Monserrate, Trujillo, Perú: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Gomez-Fuentes, M.C. (2011) Material didáctico notas del curso análisis de requerimientos. Universidad Autónoma Metropolitana.
<https://bit.ly/3yqCWQo>
- Brace, W., & Cheutet V. (2011). A Frame to Support Requirements Analysis in Engineering Design. *Journal of Engineering Design*, 23(12), 1-29.
DOI: 10.1080/09544828.2011.636735