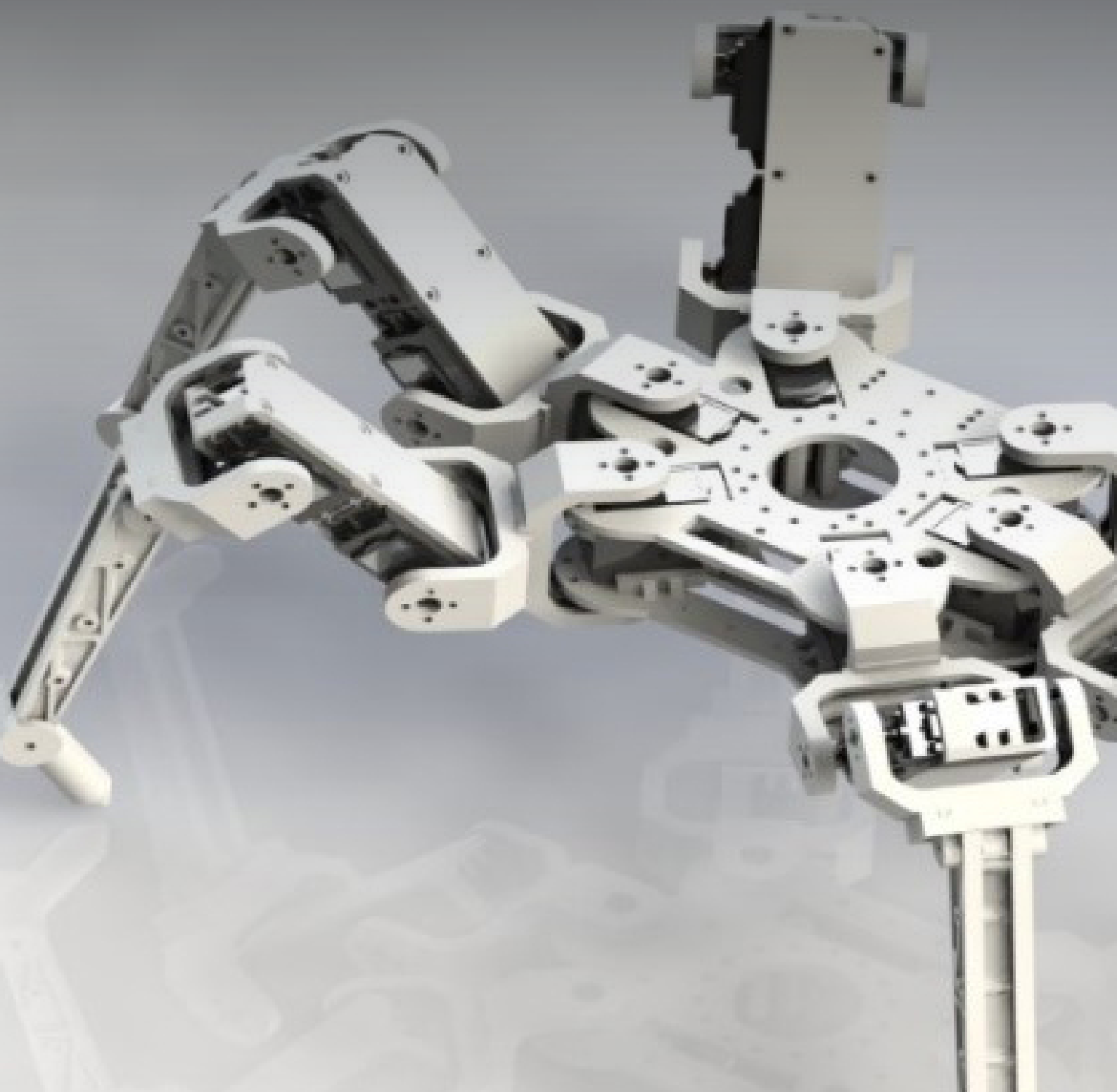


Captura de información visual en zonas agrícolas

a través de la aplicación de una cámara digital integrada a un robot explorador



Diseño e implementación de un robot explorador hexápodo para la toma de imágenes en zonas de cultivo

Design and Implementation of a Hexapod Explorer Robot for Taking Images in Growing Areas

RESUMEN

En este artículo, se muestra el desarrollo de un robot explorador hexápodo ideado para operar dentro de zonas de cultivo y con la capacidad de capturar información visual de la zona de operación por medio de una cámara digital integrada a este. El artículo comienza haciendo un breve análisis acerca de las características de las diversas clases de robots móviles a fin de explicar las razones que motivaron el desarrollo del robot hexápodo expuesto en el presente trabajo, tales como su mayor capacidad de desplazamiento sobre terreno irregular y la posibilidad de no arriesgar a un operador humano dentro de zonas de peligro. Posteriormente, se muestra el diseño del robot propuesto, el cual se basó en información extraída de varias investigaciones y fundamental para el establecimiento de las características mecánicas, electrónicas y de control de movimiento del robot. El diseño de la estructura mecánica se realizó con base en el uso de *software* asistido por computadora (CAD), mientras que su manufactura se realizó por medio de impresión 3D. El artículo continúa mostrando el ensamblaje del robot y las pruebas de operación de este. Estas pruebas, realizadas al comienzo dentro una habitación para luego ser realizadas en terrenos, descampado y de gras, permitieron corroborar el satisfactorio funcionamiento del robot. El artículo termina mostrando los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, haciendo las observaciones correspondientes a ellos y exhibiendo las conclusiones obtenidas de este trabajo.

ABSTRACT

In this paper it was shown the development of a hexapod explorer robot designed to operate within growing areas and with the capability to capture visual information from the operating area through a digital camera integrated into it. The article begins by making a brief analysis about the characteristics of the several classes of mobile robots to point out the reasons that motivated the development of the hexapod robot exposed in the present work, such as its greater ability to perform over irregular areas and the possibility of not to risking a human operator within danger zones. Subsequently, the design of the proposed robot had shown, which had based on information extracted from various researches, information that was essential for the establishment of the mechanical, electronic, and motion control characteristics of the robot. The design of the mechanical structure had carried out based on the use of computer-aided software (CAD), while its manufacture had made by 3D printing. The paper goes on to show the assembly of the robot and its operational tests. These tests had carried out at the beginning in a room and then carried out in open fields and grassland, allowing to corroborate the satisfactory performance of the robot. The article ends by showing the results obtained from the tests carried out, making the corresponding observations, and exhibiting the conclusions obtained from the entire work.



Palabras Claves

Robot móvil, robot explorador, hexápodo, vehículo no tripulado, impresión 3D.

Key words

Mobile robot, explorer robot, hexapod, unmanned vehicle, 3D printing.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen varias clases de robots móviles, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo al medio en el que se desplazan. Entre estas clases, se tienen los robots acuáticos [1], los robots terrestres [2] y los robots aéreos [3].

Entre los robots terrestres, se distinguen también subclases en las cuales se encuentran los robots que se desplazan empleando ruedas u orugas y, por otro lado, los que se desplazan utilizando extremidades. Entre estos robots, los que emplean ruedas pueden desplazarse más rápidamente; sin embargo, tienen como limitación la necesidad de un terreno plano y firme en donde operar, pues se dificulta su movimiento en terreno agreste. Por su parte, los robots que emplean orugas tienen mayor facilidad para operar en terreno agreste, pero aun así tienen dificultad para moverse en terreno irregular con presencia de plantas o rocas de tamaño importante respecto al robot. Por otro lado, los robots que emplean extremidades, sean bípedos [4], cuadrúpedos [5] o hexápodos [6], tienen como beneficio su gran capacidad de evadir tales irregularidades, gracias a la posibilidad de elevar y bajar sus extremidades cuando las irregularidades se presentan. Este beneficio motivó el desarrollo de un robot hexápodo orientado a la exploración de zonas de cultivo, que capture imágenes útiles para el estudio de dichas zonas y que en futuros trabajos extienda sus capacidades a la toma de muestras de tierra o plantas, además de información climática tal como temperatura y humedad del ambiente, composición química del aire, entre otra información útil para estudios de carácter agrícola. El robot expuesto en el presente trabajo fue diseñado para ser operado inalámbricamente con la finalidad de evitar arriesgar un operador humano durante la exploración de zonas de peligro. Asimismo, se eligió que el robot fuera de tipo hexápodo debido a la disponibilidad de información respecto a esta clase de robots, así como también debido a la mayor estabilidad de movimiento que le permiten sus seis extremidades respecto a robots con menos extremidades.

Se revisaron numerosos trabajos referentes a robots hexápodos capaces de desplazarse en ambientes de tierra, tales como los que se describen en [6], [8], [9], [10], [11] y [12]. En estos trabajos, se pueden encontrar características comunes referentes a estos robots, tales como el uso de extremidades de tres grados de libertad. Se pudo ver la existencia de robots de dimensiones muy variadas, en los cuales no se indica algún estándar que normalice tales dimensiones; de tal modo, es posible tener robots pequeños como el que se describe en [14] (de 7.5 kg) y otros grandes como el descrito en [11] (de 54 kg).

Respecto a la electrónica de control de movimiento de estos robots, el tema fue abordado en [18], [19], [20] y [21], del cual se extrajo información útil para el desarrollo del sistema electrónico de control de movimiento del robot hexápodo expuesto en el presente artículo. Cabe mencionar que dicho sistema tiene la capacidad de recibir señales inalámbricas provenientes de una estación en tierra para, sobre la base de ellas, operar los dieciocho actuadores requeridos para dar movimiento a las tres articulaciones que contiene cada una de las seis extremidades que componen al robot.

METODOLOGÍA

FISIONOMÍA DEL ROBOT HEXÁPODO

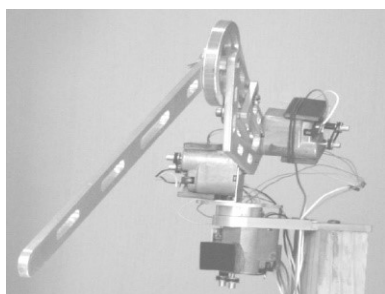
En [6], [8], [9], [14] y [15], se puede ver que la fisionomía de los robots hexápodos tiene en general las siguientes características:

- Cuerpo simétrico respecto al eje de dirección de movimiento.
- Todas las extremidades terminan en punta (superficie de poca área).
- Las dimensiones del robot guardan relación con las características de los actuadores utilizados.
- Cada extremidad cuenta con un total de tres grados de libertad de tipo articular, tal como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Extremidad del robot Oscare [13]

En la figura 2, se muestran otros casos de extremidades de robots no necesariamente hexápodos, pero que también hacen uso de tres articulaciones.



(a)



(b)



(c)

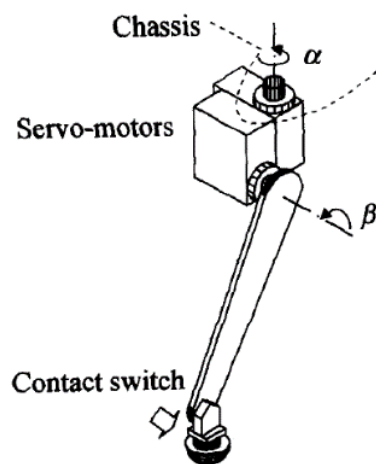
Figura 2. (a) Prototipo de extremidad [8], (b) robot Phantom X [6] y (c) robot Messor [9]

Es importante mencionar que también existen otras clases de extremidades que cuentan con menos de tres grados de libertad, tales como los descritos en [14] y [15]. Sin embargo, estas clases

de extremidades, como la que se presenta en la figura 3, son menos comunes.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Plataforma experimental RHex [14] y (b) esquema mecánico de extremidad [15]

Rango de valores para las posiciones angulares de los grados de libertad de un robot hexápodo

En [16] se muestra el desarrollo de un robot hexápodo basado en un insecto palo. En aquel trabajo, se explican los rangos

de movimiento de los grados de libertad que componen aquel robot, información que es mostrada en la tabla 1. Cabe resaltar que esta información es referencial, debido a que, para generar pasos más largos o más cortos, los grados de libertad adoptarán valores más grandes o más pequeños según sea el caso.

Tabla 1
Ángulos de grados de libertad

TABLE II JOINT ANGLES	
Section	Angle (deg)
Prothorax Legs	
α (measured from the sagittal plane)	75
β (measured from the horizontal plane)	-40
ThC RoM (measured from the sagittal plane)	+5 – +155
CTr RoM (measured from the horizontal plane)	-90 – +90
FTi RoM (measured from an extension of the femur)	-180 – 0
Mesothorax Legs	
α (measured from the sagittal plane)	85
β (measured from the horizontal plane)	-40
ThC RoM (measured from the sagittal plane)	+15 – +165
CTr RoM (measured from the horizontal plane)	-90 – +90
FTi RoM (measured from an extension of the femur)	-180 – 0
Metathorax Legs	
α (measured from the sagittal plane)	135
β (measured from the horizontal plane)	-40
ThC RoM (measured from the sagittal plane)	+65 – +215
CTr RoM (measured from the horizontal plane)	-80 – +100
FTi RoM (measured from an extension of the femur)	-180 – 0

Fuente: [16]

SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DEL ROBOT

Antecedentes

En 2010, Addanki Purna y Ch Sesha Kiran [18] desarrollaron un robot hexápodo cuyo sistema electrónico de control se basó en tres microcontroladores Atmel AT89C52 [anexo 1] (el cual fue utilizado para la implementación del sistema de control de movimiento basado en lógica difusa para un robot hexápodo [21]). Este microcontrolador de 8 bits y 2K bytes de memoria *flash* es capaz de realizar operaciones a una frecuencia de reloj de 24 MHz. Durante su trabajo, los microcontroladores fueron denominados M1, M2 y M3; en el cual M1 se ocupó de la verificación de tiempos utilizando el reloj en tiempo real DS11307,

por su parte, M2 se encargó de la operación de los servomotores del robot, mientras que M3 realizó las tareas de comunicación inalámbrica con el exterior empleando el transmisor y receptor IR TSOP1738. En este trabajo, se puede ver que, si bien se utilizaron tres microcontroladores, el trabajo de M1 debería ser prescindible en un robot que no requiera realizar movimientos de muy alta precisión. Por su parte, también existen varios microcontroladores que implementan módulos de comunicación de datos en su interior, los cuales permiten la comunicación con otros dispositivos sin requerir mayor costo computacional para estos microcontroladores siempre que no se intercambien grandes cantidades de datos, en cuyo caso también se podría prescindir de M3.

En 2003, Sasa Andelkovic y compañía [19] desarrollaron un procedimiento para el control de movimiento de un robot hexápodo con base en información proveniente de un magnetómetro. El trabajo se desarrolló sobre la base del robot hexápodo de doce grados de libertad Sprawlette que cuenta con dos microcontroladores. Si bien no se especifican los modelos de microcontroladores utilizados, se indica que uno de los microcontroladores realizó las operaciones de control de movimiento, mientras que el otro microcontrolador se dedicó a monitorear los sensores. Se agrega también que las operaciones matemáticas implicadas en el trabajo pueden ser realizadas por un microcontrolador de ocho bits. Se puede suponer que, si el robot no requiriera monitorear muchos sensores a alta frecuencia, se podría omitir el uso de un segundo microcontrolador al delegar dicha tarea a un único microcontrolador, el cual se encargaría de realizar las operaciones matemáticas de control del robot, así como también la comunicación con algún dispositivo externo.

En 2014, Mahdi Agheli y compañía [20] desarrollaron un robot hexápodo enfocado a utilizar la mínima cantidad de grados de libertad utilizados. Si bien los autores indican que un robot hexápodo usualmente es de dieciocho grados de libertad, ellos consideran que esta cantidad no es apropiada para aplicaciones de enjambre debido al costo que implica dicha cantidad de actuadores. En ese sentido, los autores desarrollaron un robot hexápodo capaz de desplazarse utilizando únicamente dos actuadores y, en consecuencia, únicamente dos grados de libertad en total. En el trabajo, se indica que el robot fue operado por una tarjeta electrónica de control basada en el microcontrolador Atmel ATtiny 2313 [anexo 2], el cual es un microcontrolador de 8 bits, 2K bytes de memoria *flash* y que puede funcionar con una frecuencia de reloj de hasta 20 MHz. Se puede inferir que, si bien el uso de una cantidad mínima de actuadores permite reducir el costo de fabricación del robot hexápodo, esto también limitaría la versatilidad de movimiento del robot y no sería justificado si se tratara de un robot independiente, que no forme parte de un enjambre.

En la tabla 2, se muestra un cuadro comparativo de los microcontroladores mencionados en esta sección.

Tabla 2
Comparación de las características de algunos microcontroladores utilizados para el control de movimiento de robots hexápodos

Referencia	Microcontrolador	Arquitectura	Memoria <i>flash</i>	Frecuencia de reloj	*NM total	*NM para el control de movimiento	Grados de libertad de robot
[18]	AT89C52	CMOS 8 bits	2K bytes	24 MHz	3	1	12
[19]	NE	8 bits	NE	NE	2	1	12
[20]	ATtiny 2313	CMOS 8 bits	2K bytes	20 MHz	1	1	2

Nota. NM es cantidad de microcontroladores y NE es no especificado.
Fuente: elaboración propia.

Selección de la tarjeta electrónica de control

El robot hexápodo propuesto en el presente trabajo consta de seis extremidades y tres grados de libertad por cada extremidad; en consecuencia, el robot cuenta con un total de dieciocho grados de libertad. Cada grado de libertad es provisto de movimiento generado por un actuador, para lo cual utiliza servomotores modelo MG996R, debido a que tales cuentan con controladores de posición angular integrados a ellos y operarlos únicamente requiere del envío de referencias de posición angular en forma de señales de tipo PWM. Cabe resaltar que se eligió este modelo de servomotor también debido a su facilidad de acceso en el mercado local y su bajo costo; además, se tomó en cuenta que son servomotores de medidas estándar, de modo que, si se encontrara algún problema de funcionamiento en ellos, serían fácilmente reemplazables por algún otro modelo; empero, experimentalmente, se encontró que estos servomotores funcionan satisfactoriamente bien en el robot hexápodo desarrollado.

En ese sentido, la tarjeta electrónica de control debe ser capaz de generar dieciocho señales de tipo PWM, hecho que puede ser conseguido con base en el uso de un microcontrolador que cuente con módulos dedicados a dicha tarea o también mediante la implementación de un algoritmo de generación de señales PWM.

La tarjeta electrónica de control también debe ser capaz de comunicarse con algún dispositivo externo, para ello se ha considerado el empleo de comunicación mediante el estándar RS232, debido a que existen librerías aplicables a muchos microcontroladores que facultan el uso de aquel estándar, a esto se agrega la existencia de tarjetas de comunicación inalámbrica que implementan circuitos integrados orientados al uso de aquel estándar, como es el caso del módulo *bluetooth* HC-05.

En el caso particular del robot hexápodo propuesto en el presente trabajo, no se requiere la lectura de sensores, por lo que tampoco se requiere el uso de un microcontrolador dedicado a ello. Sin embargo, tal microcontrolador encargado de operar los servomotores también puede recibir las señales que envían los sensores.

Con base en lo descrito en esta sección, además de las características de otros trabajos mostradas en la tabla 2, se encontró recomendable que la tarjeta electrónica de control esté basada en, por lo menos, un microcontrolador de 8 bits que pueda operar a 24 MHz, con 2K *bytes* de memoria *flash*, que cuente con 18 pines digitales de salida (utilizables para la generación de señales de tipo PWM) y al menos un módulo de comunicación en serial con el que se pueda utilizar el estándar RS232.

Si bien es posible fabricar una tarjeta electrónica sobre la base de un microcontrolador, se encontró más oportuno adquirir una tarjeta electrónica comercial que pueda cumplir dicho trabajo por menor precio. En ese sentido, se evaluó la posibilidad de utilizar alguna de las dos tarjetas electrónicas comerciales descritas a continuación:

Arduino Mega [22]:

- Número de pines de entrada y salida digital de datos: 54.
- Número de puertos UART (serial): 4.
- Memoria *flash*: 256K *bytes*.

- Frecuencia de reloj: 16 MHz.
- Arquitectura: CMOS 8 bits.
- Precio base aproximado (sin incluir costos de importación aplicables al mercado local) [22]: 38.5 USD.

Arduino Due [23]

- Número de pines de entrada y salida digital de datos: 54.
- Número de puertos UART (serial): 4.
- Memoria *flash*: 512K *bytes*.
- Frecuencia de reloj: 84 MHz.
- Arquitectura: ARM 32 bits.
- Precio base aproximado (sin incluir costos de importación aplicables al mercado local) [23]: 38.5 USD.

Dado que ambas tarjetas cumplen con las características recomendadas (excepto por la frecuencia de reloj del Arduino Mega, que es de solamente 16 MHz) y considerando que se pueden adquirir por igual precio, se prefirió utilizar como tarjeta electrónica de control al Arduino Due, debido a que tiene características que la hacen más potente (mayores memoria *flash* y frecuencia de reloj).

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA DEL ROBOT

Consideraciones para el diseño mecánico

Tal como se manifestó en la introducción, se eligió el desarrollo de un robot hexápodo debido a su gran capacidad para evadir irregularidades, además de su mayor estabilidad de movimiento respecto a otras clases de robots. Tal estabilidad, analizada desde un punto de vista de equilibrio estático, requiere que el centro de masa del robot siempre se encuentre dentro del área definida por los extremos de las extremidades que estén en contacto con el suelo. Cabe resaltar que las trayectorias de las extremidades durante el desplazamiento del robot deben definirse de modo que no colisionen entre ellas o con algún obstáculo presente en la zona de operación del robot.

Se eligió realizar el diseño mecánico con base en *software* asistido por computadora, debido a la facilidad de edición y transporte de los archivos de diseño. Asimismo, se optó por realizar el diseño orientando a su fabricación mediante impresión 3D, debido a que los equipos de fabricación 3D son de fácil acceso y no implican el uso de maquinaria altamente sofisticada o cara.

Extremidades y cuerpo central

Cada extremidad contiene dos servomotores MG996R, los cuales generan movimiento para dos de los tres grados de libertad de la extremidad, mientras que el movimiento para el tercer grado de libertad es generado por un servomotor MG996R contenido en el cuerpo central del robot. Cada extremidad tiene terminación en punta, puesto que dicha forma permite que la extremidad se sujete mejor en terreno de poca

firmeza, tales como el arenoso o el rocoso. El cuerpo central del robot es la estructura principal a la que se acoplan todas las extremidades y las tarjetas electrónicas; aunado a ello, alberga en su interior seis servomotores MG996R que generan, cada uno, movimiento para uno de los tres grados de libertad de cada extremidad.

En las figuras 4 y 5, se exhiben vistas renderizadas de una extremidad y el cuerpo central del robot, respectivamente.



Figura 4. Vista renderizada de una extremidad del robot hexápodo
Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Vista renderizada del cuerpo central del robot hexápodo.
Fuente: elaboración propia.

ENSAMBLE DEL SISTEMA MECÁNICO

Nomenclatura propuesta para extremidades y articulaciones

Se ha decidido denominar cada extremidad, R si está del lado derecho del cuerpo del robot y L si pertenece al lado

izquierdo; adicionalmente, se denomina 1 a la extremidad ubicada adelante tanto en los lados izquierdo y derecho, 2 a la extremidad ubicada en la zona central de cada uno de los lados y 3 a la extremidad ubicada en la parte posterior del robot para cada lado. Con lo que las seis extremidades se denominan R1, R2, R3, L1, L2 y L3. En lo que refiere a las articulaciones, se ha elegido denominar A a la articulación cercana al cuerpo, B a la articulación media y C a la articulación lejana al cuerpo, con lo que de forma precisa se nombra a una articulación indicando a qué extremidad pertenece como R1A, R1B y R1C para la extremidad R1 y de forma similar se realiza para cada una de las seis extremidades.

La figura 6 muestra el ensamblaje del cuerpo central con las extremidades y en la figura 7 se presenta la distribución de extremidades y articulaciones de acuerdo a lo mencionado.



Figura 6. Ensamblaje del cuerpo central
Fuente: elaboración propia.

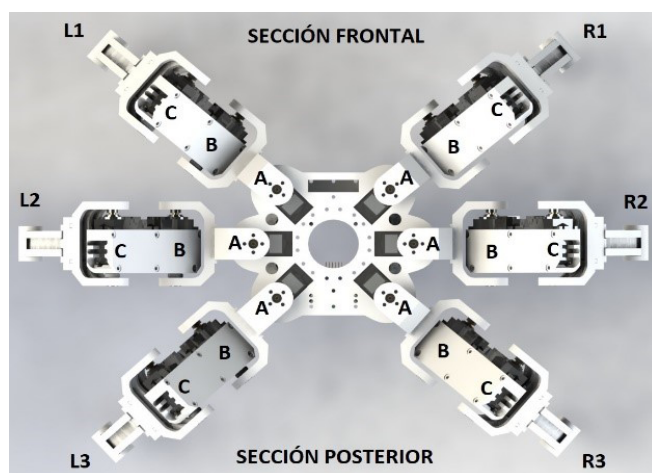


Figura 7. Vista superior: nomenclatura de extremidades y articulaciones
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3
Nomenclatura de extremidades y articulaciones

Lado	Extremidad	Articulación cercana	Articulación media	Articulación lejana
Derecho	R1	R1A	R1B	R1C
	R2	R2A	R2B	R2C
	R3	R3A	R3B	R3C
Izquierdo	L1	L1A	L1B	L1C
	L2	L2A	L2B	L2C
	L3	L3A	L3B	L3C

Fuente: elaboración propia.

MOVIMIENTO DEL ROBOT

Para realizar el movimiento del robot hexápodo, se consideran dos grupos con las extremidades del robot. Cada grupo está formado por dos extremidades de un lado y la extremidad del lado opuesto. Estos grupos se denominan grupos de movimiento, el primero está formado por las extremidades R1, L2 y R3, y el segundo por L1, R2 y L3. Si deseamos realizar el movimiento hacia adelante, el primer grupo se eleva, mientras que el segundo grupo se mantiene en el suelo y se mueve hacia atrás, en seguida el primer grupo se mueve hacia adelante y baja, seguidamente el segundo grupo se eleva, mientras que el primer grupo se mantiene en el suelo y se mueve hacia atrás, posteriormente el segundo grupo se mueve hacia adelante y baja. Esta secuencia de movimiento se aborda en detalle en la sub-sección Movimiento del robot hacia adelante

La **posición de quietud** es aquella posición por defecto en la que el hexápodo está quieto y de pie. En la tabla 4 se exhibe la medida del ángulo para la posición de quietud de cada una de las articulaciones.

Tabla 4
Ángulos para la posición de quietud

Articulación	Posición de quietud (grados)
R1A	90
R1B	50
R1C	90
R2A	90
R2B	50
R2C	90
R3A	90
R3B	50
R3C	90
L1A	90
L1B	130
L1C	90
L2A	90
L2B	130
L2C	90
L3A	90
L3B	130
L3C	90

Fuente: elaboración propia

Los movimientos pueden ser hacia adelante, hacia atrás, hacia arriba, hacia abajo, de extensión y de flexión. A continuación, describiremos cada uno de estos movimientos.

El movimiento hacia adelante consiste en ubicar el extremo de la extremidad por delante de la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos A.

El movimiento hacia atrás consiste en ubicar el extremo de la extremidad por detrás de la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos A.

El movimiento hacia arriba consiste en ubicar el extremo de la extremidad por encima de la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos B.

El movimiento hacia abajo consiste en ubicar el extremo de la extremidad por debajo de la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos B.

El movimiento de flexión consiste en ubicar el extremo de la extremidad más cerca al cuerpo central que la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos C.

El movimiento de extensión consiste en ubicar el extremo de la extremidad más lejos al cuerpo central que la posición de quietud, para lo cual es necesario cambiar las posiciones angulares a un valor que denominaremos C.

Los movimientos hacia adelante, hacia arriba y de extensión se denominan movimientos positivos, mientras que los movimientos hacia atrás, hacia abajo y de flexión se denominan movimientos negativos. En la tabla 5, se presentan los valores numéricos de las posiciones angulares de cada una de las dieciocho articulaciones. Estas posiciones angulares se obtuvieron en forma experimental, considerando que el robot debe mantenerse de pie y desplazarse según los ángulos elegidos. Cada tipo de movimiento se produce mediante una secuencia de seis pasos, tal como se indica a continuación:

Movimiento del robot hacia adelante

- p1: Mover hacia arriba (articulaciones B) y extender (articulaciones C) el grupo 1 (extremidades R1, L2 y R3).

- p2: Mover hacia atrás (articulaciones A) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3). Mover hacia adelante (articulaciones A) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p3: Mover hacia abajo (articulaciones B) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p4: Mover hacia arriba (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).
- p5: Mover hacia atrás (articulaciones A) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3). Mover hacia adelante (articulaciones A) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).
- p6: Mover hacia abajo (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).

Movimiento del robot hacia atrás

- p1: Mover hacia arriba (articulaciones B) y extender (articulaciones C) el grupo 1 (extremidades R1, L2 y R3).
- p2: Mover hacia adelante (articulaciones A) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3). Mover hacia atrás (articulaciones A) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p3: Mover hacia abajo (articulaciones B) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p4: Mover hacia arriba (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).
- p5: Mover hacia adelante (articulaciones A) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3). Mover hacia atrás (articulaciones A) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).
- p6: Mover hacia abajo (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).

Tabla 5

Valores numéricos de las posiciones angulares de cada una de las dieciocho articulaciones en los movimientos positivos, negativos y de quietud

Articulación	Movimiento negativo (grados)	Posición de quietud (grados)	Movimiento positivo (grados)
R1A	70	90	110
R1B	30	50	110
R1C	70	90	110
R2A	70	90	110
R2B	30	50	110
R2C	70	90	110
R3A	70	90	110
R3B	30	50	110
R3C	70	90	110
L1A	110	90	70
L1B	150	130	70
L1C	110	90	70
L2A	110	90	70
L2B	150	130	70
L2C	110	90	70
L3A	110	90	70
L3B	150	130	70
L3C	110	90	70

Fuente: elaboración propia

Giro hacia la derecha

- p1: Mover hacia arriba (articulaciones B) y extender (articulaciones C) el grupo 1 (extremidades R1, L2 y R3).
- p2: Mover hacia adelante (articulaciones A) L1 y L3 y mover hacia atrás (articulaciones A) R2. Mover hacia

atrás (articulaciones A) R1 y R3 y mover hacia adelante (articulaciones A) L2.

- p3: Mover hacia abajo (articulaciones B) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p4: Mover hacia arriba (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).

- p5: Mover hacia atrás (articulaciones A) R1 y R3 y mover hacia adelante (articulaciones A) L2. Mover hacia adelante (articulaciones A) L1 y L3 y mover hacia atrás (articulaciones A) R2.
- p6: Mover hacia abajo (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).

Giro hacia la izquierda

- p1: Mover hacia arriba (articulaciones B) y extender (articulaciones C) el grupo 1 (extremidades R1, L2 y R3).
- p2: Mover hacia atrás (articulaciones A) L1 y L3 y mover hacia adelante (articulaciones A) R2. Mover hacia adelante (articulaciones A) R1 y R3 y mover hacia atrás (articulaciones A) L2.
- p3: Mover hacia abajo (articulaciones B) el primer grupo (extremidades R1, L2 y R3).
- p4: Mover hacia arriba (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).
- p5: Mover hacia adelante (articulaciones A) R1 y R3 y mover hacia atrás (articulaciones A) L2. Mover hacia atrás (articulaciones A) L1 y L3 y mover hacia adelante (articulaciones A) R2.
- p6: Mover hacia abajo (articulaciones B) el segundo grupo (extremidades L1, R2 y L3).

OPERACIÓN INALÁMBRICA

Se utilizaron comandos CMD para ordenar al robot en forma inalámbrica, vía *bluetooth*, a fin de que pueda realizar los movimientos antes descritos. En la tabla 6, se indica el valor decimal de estos comandos y la descripción del movimiento que realizará el robot. Se utilizó la herramienta GUIDE de Matlab R2018 para desarrollar una interface gráfica de usuario, mediante la cual es posible enviar los comandos mencionados. En la figura 8, se muestra la descripción de esta interfase gráfica, en la cual se muestran las opciones para elegir el tipo de movimiento. En la tabla 7, se describe la tarea que se realiza al seleccionar las opciones de la interface gráfica. La comunicación inalámbrica utilizada es para distancias menores a diez metros.

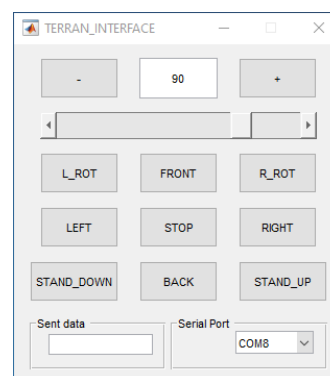


Figura 8. Interface gráfica
Fuente: elaboración propia.

Tabla 6
Valores numéricos asignados a cada comando y descripción de estos

CMD	Valor	Descripción
48	Stop	Detener el movimiento y permanecer en posición inicial (de pie)
51	Stand up	Ponerse de pie
49	Stand down	Reposar el cuerpo central sobre el suelo
56	Front movement	Movimiento hacia adelante
50	Back movement	Movimiento hacia atrás
54	Right movement	Movimiento hacia la derecha
52	Left movement	Movimiento hacia la izquierda
57	Right rotation	Rotación hacia la derecha
55	Left rotation	Rotación hacia la izquierda
[100, 215]	Angle	Ángulo de posición de cámara = CMD - 100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7
Controles de la interface gráfica de usuario y comandos que representan

Control	Tipo	Función
-	Botón	Decrece en una unidad el ángulo de la cámara
+	Botón	Aumenta en una unidad el ángulo de la cámara
Ángulo	Cuadro de texto	Se indica el ángulo de la cámara
Barra ángulo	Barra deslizante	Se indica el ángulo de la cámara
Stop	Botón	Envía comando <i>stop</i>
Stand up	Botón	Envía comando <i>stand up</i>
Stand down	Botón	Envía comando <i>stand down</i>
Front	Botón	Envía comando <i>front movement</i>
Back	Botón	Envía comando <i>back movement</i>
Right	Botón	Envía comando <i>right movement</i>
Left	Botón	Envía comando <i>left movement</i>
L rot	Botón	Envía comando <i>left rotation</i>
R rot	Botón	Envía comando <i>right rotation</i>
Send data	Cuadro de texto	Muestra el comando enviado
Serial port	Lista	Permite seleccionar el puerto serial a utilizar para la comunicación

Fuente: elaboración propia.

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

Ubicación del módulo HC-05 en robot hexápodo:

- Se instaló un módulo de comunicación inalámbrica *bluetooth* HC-05 para permitir comunicación entre una estación en tierra con el robot.
- Ver figura 9.

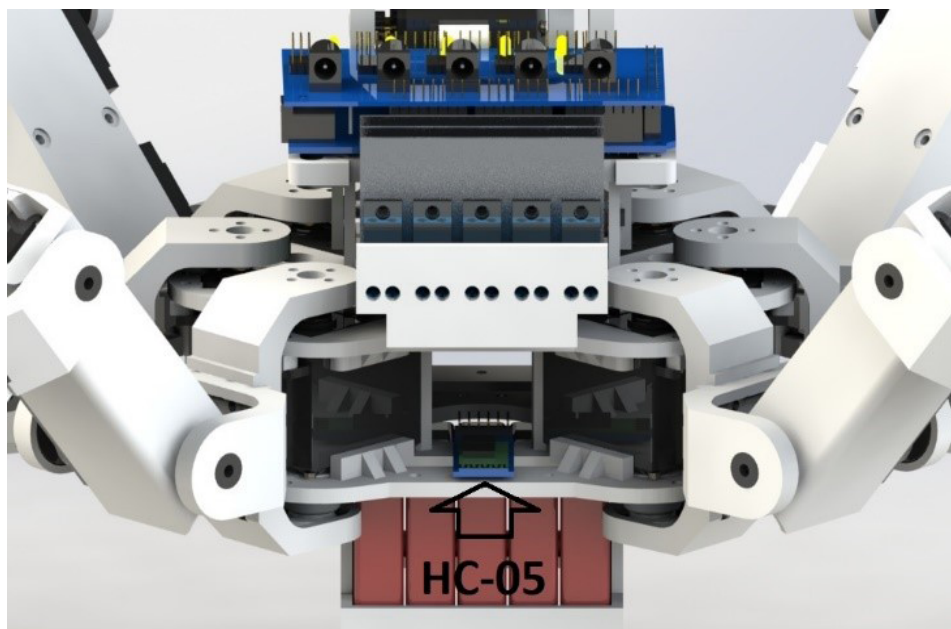


Figura 9. Ubicación de módulo HC-05 en robot hexápodo
Fuente: elaboración propia.

Servomotor para movimiento de cámara digital:

- Se instaló un soporte que permite la ubicación de un servomotor adicional MG996R para modificar el ángulo

vertical de la cámara, así como soportar las tarjetas electrónicas.

- Ver figura 10.

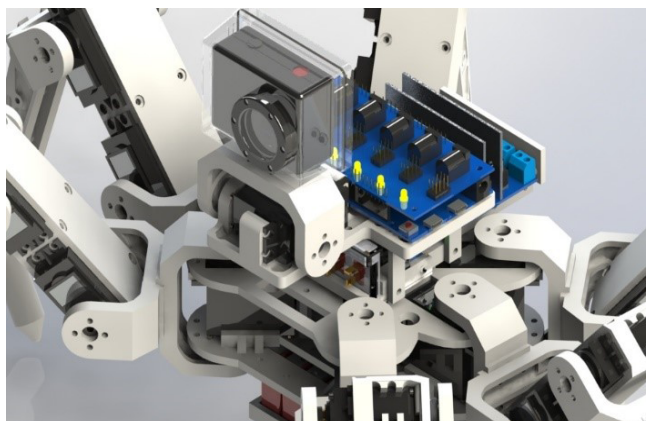


Figura 10. Servomotor para movimiento de cámara digital
Fuente: elaboración propia.

Vista general del hexápodo:

- Ver figura 11.

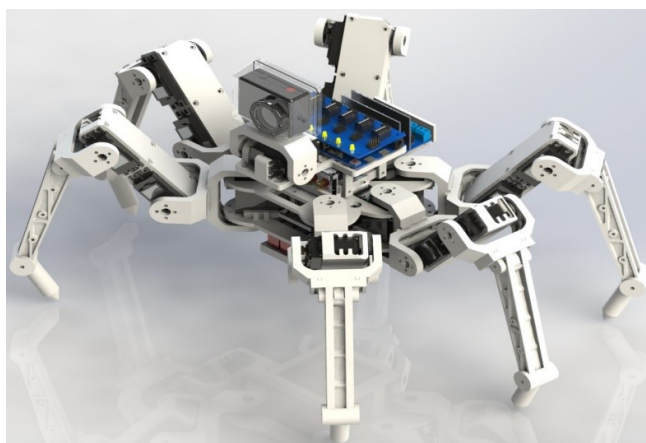
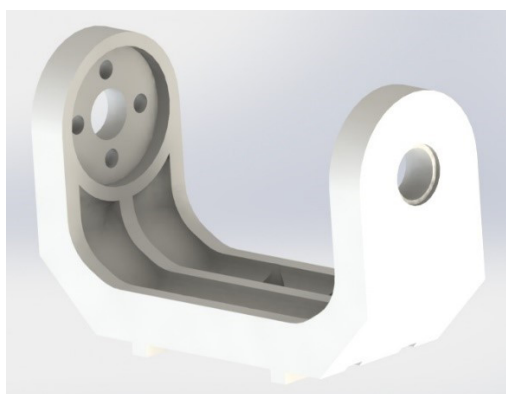


Figura 11. Vista general del robot hexápodo
Fuente: elaboración propia.

Diseño de una pieza de la estructura mecánica del robot hexápodo y la impresión 3D de tal pieza:

- Ver figura 12.



(a)

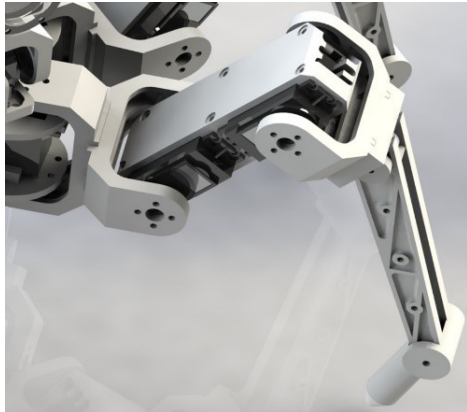


(b)

Figura 12. (a) Pieza diseñada con software CAD y (b) pieza fabricada con impresión 3D
Fuente: elaboración propia.

En la figura 13, se muestra el diseño de una de las patas ensambladas al cuerpo del robot, el movimiento de la pata

se debe a los tres servomotores MG996R incorporados en la pata.



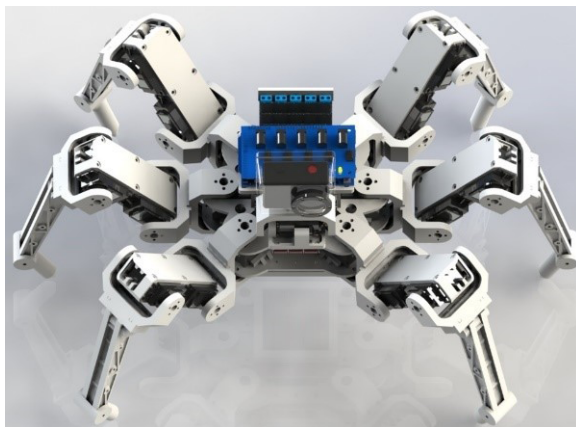
(a)



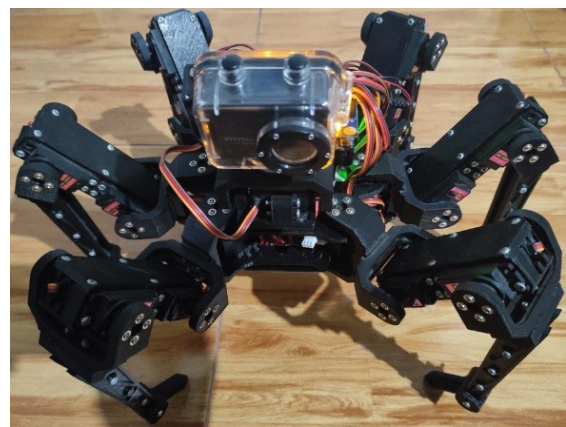
(b)

Figura 13. (a) Pata diseñada con software CAD y (b) pata fabricada con impresión 3D
Fuente: elaboración propia.

En la figura 14, se muestra el diseño del cuerpo, las seis patas acopladas al cuerpo del robot y la impresión 3D de este sistema mecánico.



(a)



(b)

Figura 14. (a) Robot hexápodo diseñado con software CAD y (b) robot hexápodo fabricado con impresión 3D
Fuente: elaboración propia.

DISEÑO DE LA INTERFACE DE POTENCIA

La plataforma electrónica de desarrollo Arduino Due (indicado en la sección respecto a antecedentes en electrónica de control) no está diseñada para proveer energía a los actuadores tales como los servomotores, por lo cual se ha diseñado una tarjeta electrónica (ver figura 15) que se acople a esta y reciba la energía de cinco baterías; cada batería de dos celdas y 1000

mA/h puede suministrar energía a cuatro servomotores. En este proyecto, se utilizarán dieciocho servomotores. Las señales de control PWM están disponibles en los pines 3, 4, 22, 24, 26, 28, 32, 34, 35, 29, 33, 30, 46, 48, 53, 51, 49, 47, 25 y 23. Esta tarjeta cuenta, además, con un puerto de comunicación en serie, que permite que el robot interactúe con un dispositivo externo por medio del uso del módulo de comunicación inalámbrica *bluetooth* HC-05.

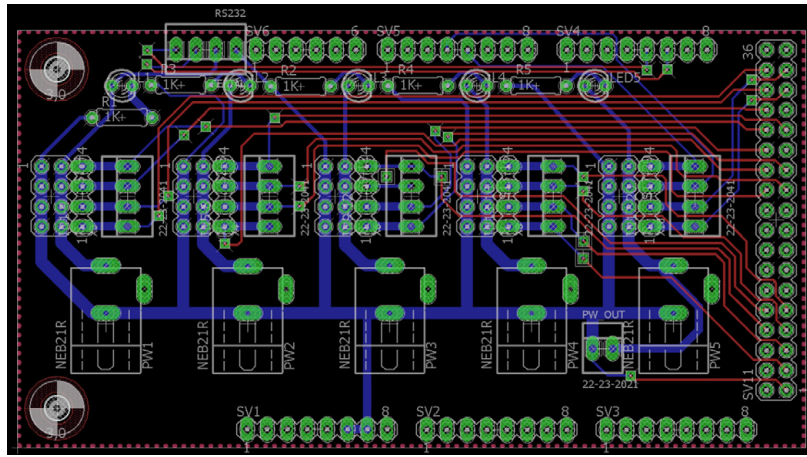


Figura 15. Tarjeta electrónica para interface de potencia
Fuente: elaboración propia.

En la figura 16, se presenta el diseño de una tarjeta reguladora de tensión de cinco líneas de seis VDC cada una, la que será

suministrada a los servomotores. Se diseñó una estructura adicional para instalar esta tarjeta.

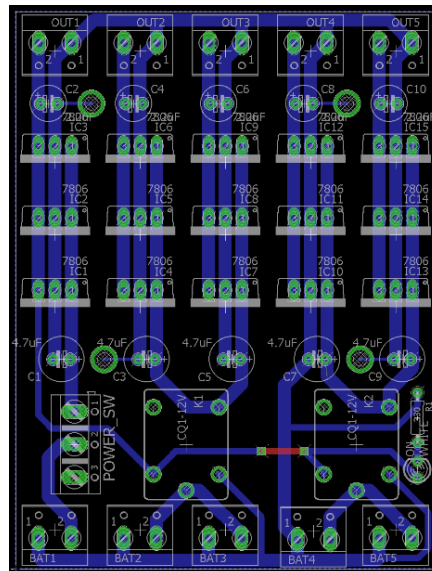
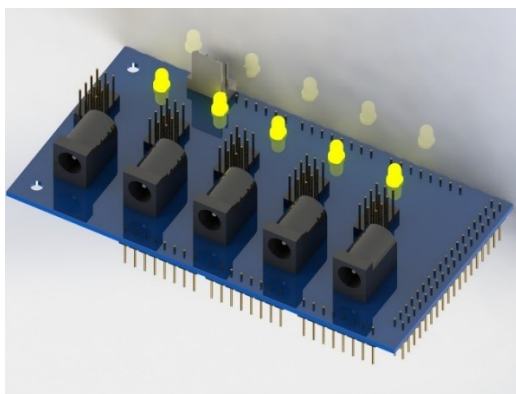
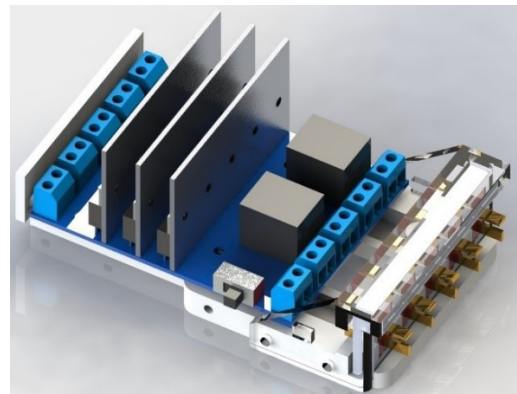


Figura 16. Diseño de tarjeta electrónica reguladora de tensión
Fuente: elaboración propia.

En la figura 17, se exhibe una representación en CAD de las tarjetas de interface de potencia y reguladora de tensión.



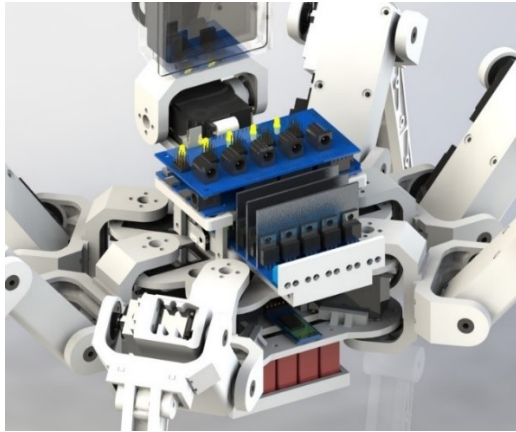
(a)



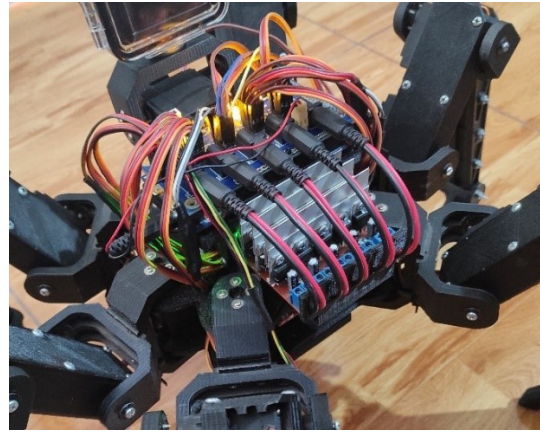
(b)

Figura 17. (a) Modelos en CAD de interface de potencia y (b) del regulador de tensión con estructura de soporte
Fuente: elaboración propia.

En la figura 18, se enseñan el modelo en CAD de las tarjetas electrónicas integradas al robot y el robot implementado con estas tarjetas, así como el cableado respectivo.



(a)



(b)

Figura 18. (a) Modelo en CAD de tarjetas electrónicas integradas y (b) implementación de las tarjetas electrónicas integradas
Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Tal como se muestra en la figura 19, se acopló la cámara digital Vivitar DVR786HD por medio de un tornillo. Esta cámara cuenta con una rosca para acople estándar, por lo que el robot

puede soportar otros modelos de cámaras digitales de varios fabricantes. Asimismo, se eligió para las pruebas utilizar una cámara (DVR786HD) que pueda ser operada inalámbricamente, aunque este modelo no transmite video, es posible utilizar otras cámaras con mayores prestaciones tales como GoPro Hero 7 [24].

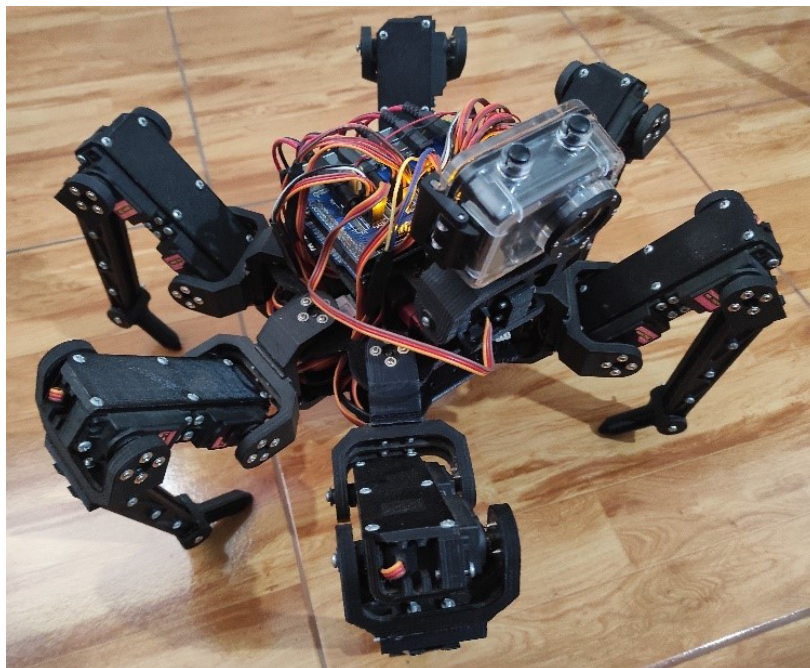
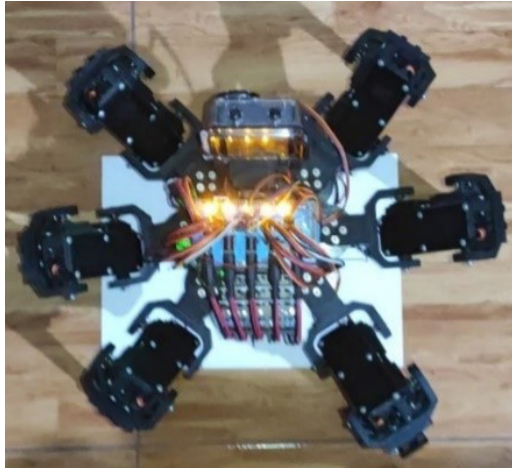


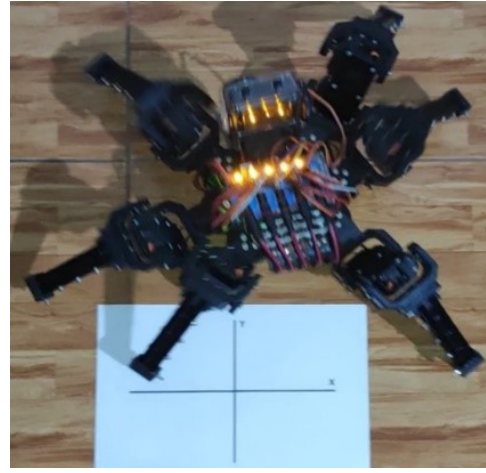
Figura 19. Robot hexápodo con cámara digital Vivitar DVR786HD
Fuente: elaboración propia.

Antes de probar el robot en un terreno irregular, se realizó el movimiento del robot sobre el piso liso, para lo cual se colocó en el piso un papel como referencia para ver de forma clara los

movimientos del robot. Las figuras 20, 21, 22 y 23 muestran el movimiento del robot en varias direcciones: hacia adelante, atrás, derecha e izquierda.

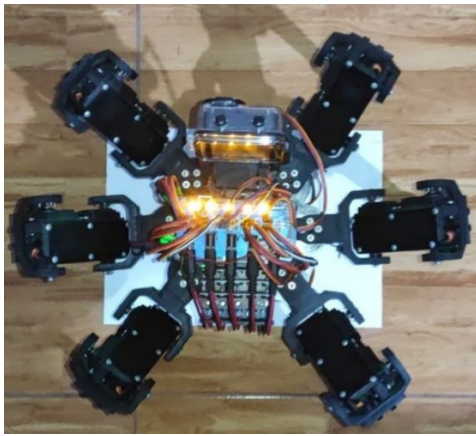


(a)

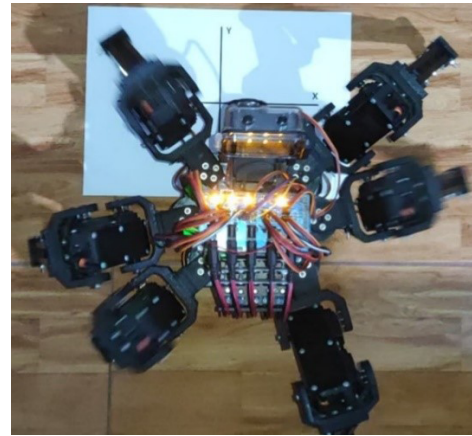


(b)

Figura 20. Movimiento del robot hacia adelante: (a) posición inicial y (b) posición final
Fuente: elaboración propia.

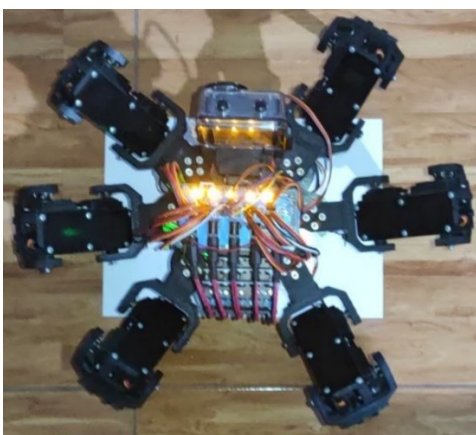


(a)

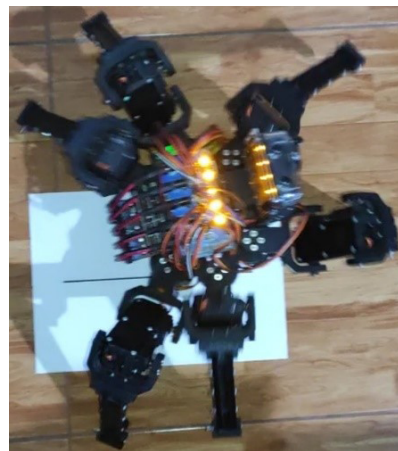


(b)

Figura 21. Movimiento del robot hacia atrás: (a) posición inicial y (b) posición final
Fuente: elaboración propia.

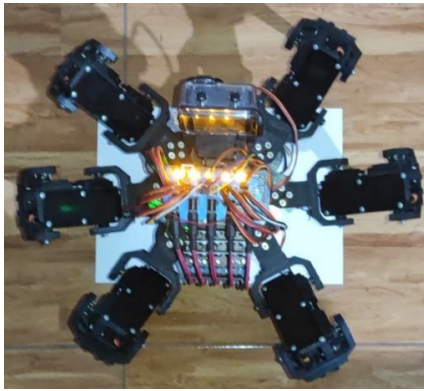


(a)

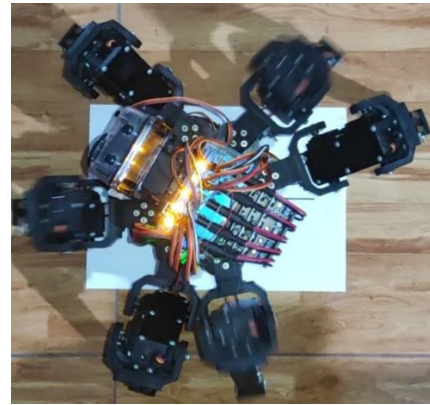


(b)

Figura 22. Giro hacia la derecha: (a) posición inicial y (b) posición final
Fuente: elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 23. Giro hacia la izquierda: (a) posición inicial y (b) posición final

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se hicieron las pruebas en un terreno irregular, tal como se muestra en la figura 24.



Figura 24. Movimiento del robot hexápodo sobre una superficie irregular

Fuente: elaboración propia.

El sistema de operación inalámbrica por comandos a través de un módulo *bluetooth* funcionó correctamente durante la operación y envió información para que el robot se mueva hacia adelante y

hacia atrás, y gire hacia la derecha y la izquierda. En la figura 25, se presenta la interface gráfica de usuario para enviar el comando de movimiento hacia adelante.

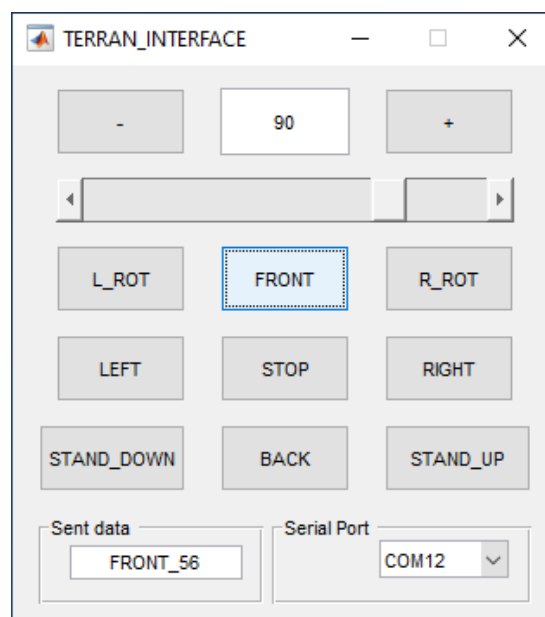


Figura 25. Interface gráfica de usuario enviando el comando Mover hacia adelante por el puerto COM12 de la PC

Fuente: elaboración propia.

El desplazamiento del robot fue más eficiente en un terreno irregular sin arbustos que en una superficie de concreto o con abundante gras. La cámara digital incorporada en el robot permitió

obtener las imágenes del terreno sobre el cual se desplazaba el robot, tal como se aprecia en la figura 26.



Figura 26. Imagen captada por la cámara incorporada en el robot en dos tipos de terrenos
Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio del robot hexápodo, con seis patas, cada una de estas con tres grados de libertad, lo cual permitió realizar tareas de exploración sobre superficies irregulares.
- Se diseñó la estructura mecánica del robot hexápodo, la cual consiste de un cuerpo central y seis patas con tres articulaciones cada una. Se utilizó el diseño asistido por computadora CAD.
- Se utilizó la impresión 3D para construir la estructura mecánica del robot, esta impresión se realizó por partes, las cuales fueron ensambladas.
- Se consideraron tres servomotores por cada pata para la generación del movimiento y un servomotor para el giro de la cámara digital, los cuales son controlados por una plataforma electrónica basada en Arduino Due.
- Se realizó la comunicación inalámbrica por medio de los módulos *bluetooth* a una distancia máxima de diez metros y se utilizó una cámara digital básica para la captura de imágenes.
- Se utilizó una fuente formada por cinco baterías de litio y polímero, con dos celdas y 1 A para suministrar energía eléctrica, a través de un regulador de tensión, a los servomotores y los módulos de control.
- Se logró manipular en forma inalámbrica al robot hexápodo sobre un terreno irregular sin arbustos y en varias direcciones de movimiento (hacia adelante y atrás y giro hacia la derecha y la izquierda).
- Se logró obtener las imágenes del terreno, sobre el cual se desplazaba el robot, mediante una cámara incorporada en la estructura del robot. Luego, estas imágenes se analizaron en la computadora.
- Se verificó que el robot no se desplace adecuadamente en superficies lisas.
- Se verificó que el robot no se desplace adecuadamente en superficies blandas, debido a que los extremos del robot tienden a penetrar estas superficies.

REFERENCIAS

- [1] Pollard, B. y Tallapragada, P. (abril 2017). An aquatic robot propelled by an internal robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22(2).
- [2] Kuppuswamy, N., Cho, S., Stomier, D., Choi, S. y Kim, J. *Design of an omnidirectional robot for FIRA Robosot*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/264841048_DESIGN_OF_AN_OMNIDIRECTIONAL_ROBOT_FOR_FIRA_ROBOSOT.
- [3] Wang, Q., Wu, L., Chen, S., Shu, D., Xu, Z., Li, F. y Wang, R. (mayo 2014). Evaluation of 3D geometry for low-attitude UAV images: a case study at Zijin mine. *The International Archives of the Photogrammetry - Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Technical Commission IV Symposium, XL-4*, 297-300.
- [4] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. y Hirukawa, H. (septiembre 2003). *Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point*. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1620-1626.
- [5] Hirose, S., Fukuda, Y., Yoneda, K., Nagakubo, A., Tsukagoshi, H., Arikawa, K., Endo, G., Doi, T. y Hodoshima, R. (junio 2009). Deking, analysis, and gait control methods. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 104-114.
- [6] Best, G., Moghadam, P., Kottege, N. y Kleeman, L. (diciembre 2013). *Terrain classification using a hexapod robot*. Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation. Universidad de Nueva Gales del Sur, Sídney, Australia.
- [7] Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C. y Kim, J. (julio 2015). *Optimization based controller design and implementation for the atlas robot in the DARPA robotics challenge finals*. International Conference on Humanoid Robots.
- [8] Vargas, J. (octubre 2016). *Diseño de un robot hexápodo tipo hormiga*. 8. ° Congreso Mexicano de Robótica, COMRob 2006. Torre de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 80-85.

- [9] Belter, D. y Skrzypczynsky, P. (septiembre 2011). *Integrated motion planning for a hexapod robot walking on rough terrain*. Preprints of the 18th IFAC World Congress, 6918-6923. Milán, Italia.
- [10] Mostafa, K., Tsai, C. y Her, I. (2010). Alternative gaits for multiped robots with leg failures to retain maneuverability. *International Journal of Advanced Robotics Systems*, 7(4), 33-40.
- [11] Gonzales, P., García, E., Ponticelli, R. y Armada, M. (diciembre 2008). Minimizing energy consumption in hexapod robots. *Advanced Robotics* 23, 681-704. <https://doi.org/10.1163/156855309X431677>.
- [12] Carbone, G., Yatsuna, A., Ceccarelli, M. y Yatsun, S. (julio 2009). *Design and simulation of Cassino Hexapod robot*. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Systems, 301-307.
- [13] Jakinovsky, B. y Maehle, E. (marzo 2010). In situ self-reconfiguration of hexapod robot OSCAR using biologically inspired approaches. *Climbing and Walking Robots*, 311-332.
- [14] Saranlı, U., Buehler, M. y Koditschek, D. (julio 2001). RHex: a simple and highly mobile hexapod robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7), 616-631.
- [15] Preumont, A., Alexandre, P., Doroftei, I. y Goffin, F. (1997). A conceptual walking vehicle for planetary exploration. *Mechatronics*, 7(3), 287-296.
- [16] William, A., Lewinger, H., Reekie, M. y Webb, B. (2011). *A hexapod robot modeled on the stick insect, Carausius morosus*. 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). <https://doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088569>.
- [17] Ohnishi, T. y Asakura, T. (septiembre-octubre 2004). *On walking behavior strategy for spider-robot based on environmental information*. Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Miyagi, Japón.
- [18] Ramesh, A. y Kumar, C. (2010). Autonomous home automated hexapod robot. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2(9), 3016-3020.
- [19] Anđelković, S., Veličković, I., Rašić, M. y Đorđević, G. (2003). Digital compass as heading sensor for hexapod robot. *Journal of Automatic Control*, 13(2), 11-16.
- [20] Agheli, M., Faal, S., Chen, F., Gong, H. y Onal, C. (mayo-junio 2014). *Design and manufacturing of a foldable hexapod robot towards experimental swarm applications*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907287>.
- [21] Farooq, U., Asad, M., Amar, M., Hanif, A. y Saleh, S. (abril 2014). Fuzzy logic based real time obstacle avoidance controller for simplified model of hexapod walking robot. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 6(2), 127-131.
- [22] Arduino.cc. (abril 2019). *Arduino Mega 2560 REV3*. Recuperado de: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.
- [23] Arduino.cc. (abril 2019). *Arduino Due*. Recuperado de: <https://store.arduino.cc/usa/due>.
- [24] GoPro. (septiembre 2019). *Hero 7 Black*. Recuperado de: <https://gopro.com/en/pe/shop/cameras/hero7-black/CHDX-701-master.html>.
- [25] Maker Pro. (septiembre 2019). *HC-05 Datasheet | Bluetooth Transceiver Module*. Recuperado de: <https://maker.pro/custom/tutorial/hc-05-bluetooth-transceiver-module-datasheet-highlights>.

Anexos

[Anexo 1] Atmel (abril de 2019), "8-bit Microcontroller with 2K Bytes Flash AT89C2051", disponible en: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc0368.pdf>

[Anexo 2] Atmel (abril de 2019), "8-bit AVR Microcontroller with 2K Bytes In-System Programmable Flash ATtiny 2313/V", disponible en: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2543-AVR-ATtiny2313_Datasheet.pdf

[Anexo 3] Digi (septiembre de 2019), "Zigbee RF Modules", disponible en: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

ACERCA DE LOS AUTORES

MSc. José Machuca Mines

Ingeniero electrónico, egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería, magíster en Automática e Instrumentación, egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería y docente universitario en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Profesor de antegrado y posgrado.

BSc. Juan Carlos Suárez Quispe

Bachiller en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería con amplia experiencia en participación en trabajos de investigación para INICTEL-UNI e IIFIEE-UNI en actividades relacionadas al diseño y la implementación de sistemas de control digital. Cuenta con participación en múltiples eventos de carácter científico-tecnológico nacionales e internacionales tales como talleres, conferencias, cursos y charlas, así como formación constante en temas relacionados a ingeniería de control e inteligencia artificial. Cuenta con un diplomado en Gestión de Proyectos según los lineamientos del PMI (Project Management Institute), además de estudios concluidos de maestría en Automática e Instrumentación en la Universidad Nacional de Ingeniería.

@ jsuarezq@uni.pe

Ing. Ernesto Juan Godínez de la Cruz

Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería, estudios concluidos de maestría en Automática e Instrumentación en la Universidad Nacional de Ingeniería y diplomado en Mecatrónica de Tecsup. Con experiencia en diseño y ejecución de proyectos de electrificación, diseño y construcción de tableros eléctricos para centros de control de motores. Ha participado en trabajos de investigación para IIFIEE-UNI en actividades relacionadas al diseño y la implementación de sistemas de control digital. Es docente en la especialidad de Electrónica y Automatización industrial de Tecsup en los cursos de Instrumentación Industrial y Estrategias de Control Automático.

@ egodínez@tecsup.edu.pe

Ing. Wilson Marín Quevedo

Ingeniero eléctrico de la Universidad Nacional de Ingeniería y con estudios culminados de maestría en Automática e Instrumentación en dicha universidad. Ha participado en trabajos de investigación para IIFIEE-UNI en actividades relacionadas al diseño y la implementación de sistemas de control digital. Tiene experiencia en instalaciones eléctricas y automatización de embarcaciones pesqueras.

@ wilson-quevedo@hotmail.com

Recibido: 30-04-21
Revisado: 12-08-21
Aceptado: 11-09-21



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.