

---

# T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Vol. 13 No. 2  
Julio - Diciembre de 2016  
ISSN 1692-8407

# T e k h n ê

## Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volumen 13 - Número 2 - 2016

ISSN 1692-8407



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA

### Editor

Ph.D(c) Prof. Fredy H. Martínez S.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

### Comité editorial

#### → Interno:

Ph.D César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D Luis Fernando Martínez Sarmiento  
Fundación Universitaria Empresarial de la Cámara de Comercio  
de Bogotá (Colombia)

M.Sc Edwar Jacinto Gómez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Fernando Martínez Santa  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Jhon Jairo Galvis López  
Consejo Profesional Nacional de Tecnólogos en Electricidad,  
Electromecánica, Electrónica y Afines (Colombia)

#### → Científico:

Ph.D José Javier Padilla Torralvo  
Old Dominion University (USA)

Ph.D Camilo Eduardo Sarmiento Cortes  
Max Planck Institute for Mathematics in the Sciences (Germany)

Ph.D Rigoberto López-Padilla  
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas  
CIATEC A.C. (México)

Ph.D Mario Ricardo Arbulú Saavedra  
Universidad de la Sabana (Colombia)

Ph.D Carlos Arturo Ramírez Escobar  
Universidad Autónoma de Colombia (Colombia)

### Árbitros

M.Sc Libia Susana Urrego Rivillas  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Edwar Jacinto Gómez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc José Iván Madrid Vega  
Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia)

M.Sc(c) Jorge Eliecer Posada  
Natura Software Ltda (Colombia)

M.Sc(c) Cristian Camilo Forero Díaz  
Corporación Universitaria Republicana (Colombia)

Ph.D César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc(c) Diego Armando Giral Ramírez  
Universidad de los Andes (Colombia)

M.Sc(c) José Alexander Martínez Valencia  
VATIA S.A. E.S.P. (Colombia)

Lic. Diego Fernando Quiroga  
Universidad Pedagógica Nacional (Colombia)

M.Sc Yaqueline Garzón Rodríguez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

### Asistentes de edición

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

**Cubierta:** Centro del Centenario de Breslavia (polaco: Hala  
Stulecia o Hala Ludowa), Wrocław (Polonia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

### Contracubierta:

⊙ Superior izquierda: Lóbulo radiado sensor HC-SR04 (Benitez,  
J., Parra, L. y Montiel, H.)

⊙ Superior derecha: Esquema de funcionamiento pestaña recien-  
tes (Castillo, E., Rojas, H. y Jacinto, E.)

⊙ Centro: Dimensiones pieza de acople vista inferior del ante-  
brazo (García, A. y Becerra, A.)

⊙ Inferior izquierda: Diagrama del esquema de control difuso  
propuesto (Galvis, J. y Madrid, J.)

⊙ Inferior derecha: Representación punto de inicio punto final  
(González, O., y Acero, D.)

### Corrección de estilo español

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

### Corrección de estilo inglés

Andrea Castiblanco Ortiz

### Impresión

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Formato 21.5 × 28 cm

Papel Bond 75 g

Tiraje de 70 ejemplares

---

## Revista Tekhnê

La revista Tekhnê es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Posee un carácter científico, y atiende a la comunidad nacional e internacional especialista en áreas de ingenierías eléctrica, electrónica, mecánica, de sistemas, industrial y civil. Publica resultados de investigación en español o inglés (artículos originales e inéditos), y está completamente abierta a especialistas de todo el mundo en calidad de autores y/o lectores. Es arbitrada mediante un proceso doble ciego, con rotación continua de árbitros. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

## Periodicidad

La revista Tekhnê posee una periodicidad semestral, coincidente con los semestres académicos de la Universidad Distrital. La publicación se realiza los meses de julio y diciembre. El primer volumen de la revista se publicó el primer semestre de 2003, manteniendo su regularidad hasta la fecha.

## Misión

La revista Tekhnê tiene como misión divulgar resultados de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Propende por la difusión de resultados y su acceso abierto y libre.

## Público objetivo

La revista está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científica en el campo de la ingeniería.

## Forma de adquisición

La revista Tekhnê se puede adquirir a través de compra, canje o suscripción.

## Suscripción

El precio unitario de la revista es de 8.000 pesos (el precio no incluye el valor del envío). La suscripción anual tiene un costo de 21.000 pesos para Colombia, 20 USD para América Latina y el Caribe, 30 USD para otras regiones (el precio incluye el valor del envío).

## Reproducción

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de la revista para uso académico o interno de las instituciones citando adecuadamente la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores, y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial o de la Universidad Distrital.

## Dirección postal

**Prof. Fredy H. Martínez S.**

Editor y director revista Tekhnê

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 301

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A-35 sur

Teléfono: (571) 3238400 Ext. 5003

Celular: (57) 3005585481

Bogotá D.C., Colombia

E-Mail: [tekhneud@udistrital.edu.co](mailto:tekhneud@udistrital.edu.co)

Url: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>

# T e k h n ê

## Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volume 13 - Number 2 - 2016

ISSN 1692-8407



**DISTRICT UNIVERSITY**  
**FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**  
TECHNOLOGICAL FACULTY

### Editor

Ph.D(c) Prof. Fredy H. Martínez S.  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

### Editorial committee

#### → Inner:

Ph.D César Augusto García Ubaque  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D Luis Fernando Martínez Sarmiento  
Fundación Universitaria Empresarial de la Cámara de Comercio  
de Bogotá (Colombia)

M.Sc Edwar Jacinto Gómez  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Fernando Martínez Santa  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D(c) Jhon Jairo Galvis López  
Consejo Profesional Nacional de Tecnólogos en Electricidad,  
Electromecánica, Electrónica y Afines (Colombia)

#### → Scientific:

Ph.D José Javier Padilla Torralba  
Old Dominion University (USA)

Ph.D Camilo Eduardo Sarmiento Cortes  
Max Planck Institut für Mathematik in den Naturwissenschaften  
(Germany)

Ph.D Rigoberto López-Padilla  
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas  
CIATEC A.C. (Mexico)

Ph.D Mario Ricardo Arbulú Saavedra  
Universidad de la Sabana (Colombia)

Ph.D Carlos Arturo Ramírez Escobar  
Universidad Autónoma de Colombia (Colombia)

### Evaluators

M.Sc Libia Susana Urrego Rivillas  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Edwar Jacinto Gómez  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc José Iván Madrid Vega  
Technological University of Pereira (Colombia)

M.Sc(c) Mariela Castiblanco Ortiz  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc(c) Jorge Eliecer Posada  
Natura Software Ltda (Colombia)

M.Sc(c) Cristian Camilo Forero Díaz  
Corporación Universitaria Republicana (Colombia)

Ph.D César Augusto Hernández Suárez  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc(c) José Alexander Martínez Valencia  
VATIA S.A. E.S.P. (Colombia)

Lic. Diego Fernando Quiroga  
National Pedagogic University (Colombia)

M.Sc Yaqueline Garzón Rodríguez  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

### Journal assistant

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

**Cover picture:** Centennial Hall (Polish: Hala Stulecia, formerly  
Hala Ludowa), Wrocław (Polonia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

### Back cover picture:

⊙ Top left: HC-SR04 sensor radiation lobe (Benitez, J., Parra,  
L. and Montiel, H.)

⊙ Top right: Schematic of operation, recent tab (Castillo, E.,  
Rojas, H. and Jacinto, E.)

⊙ Middle: Dimensions of the coupling part inferior view of the  
forearm (García, A. and Becerra, A.)

⊙ Lower left: Diagram of proposed diffuse control scheme (Gal-  
vis, J. and Madrid, J.)

⊙ Lower right: Representation start point end point (González,  
O., and Acero, D.)

### Style correction in spanish

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

### Style correction in english

Andrea Castiblanco Ortiz

### Printed by

District University Francisco José de Caldas press  
Format: 21.5 × 28 cm  
Paper: Bond 75 g  
Printing: 70 copies

---

## **Tekhnê Journal**

Tekhnê Journal is an institutional publication from the Technological Faculty at District University Francisco José de Caldas. It has a scientific nature and attends the specialist national and international community in the areas of electrical, electronics, mechanical, systems, industrial and civil engineering. The journal publishes research results in Spanish or English (original and unpublished papers), and is fully open to experts from around the world as authors and/or readers. It is arbitrated by a double-blind process, with continuous rotation of evaluators. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of papers in internationally indexed journals by its own members.

Cell phone: (57) 3005585481

Bogotá D.C., Colombia

E-Mail: [tekhneud@udistrital.edu.co](mailto:tekhneud@udistrital.edu.co)

Url: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>

## **Periodicity**

Tekhnê journal has twice a year periodicity, coinciding with the academic semesters of the District University. The publication is made in July and December. The first edition of the journal was published the first half of 2003, keeping its regularly until today.

## **Mission**

Tekhnê journal is aimed at publishing research results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions. It aims for the dissemination of results and its open and free access.

## **Target audience**

Tekhnê journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific research processes in the field of engineering.

## **Form of acquisition**

Tekhnê journal is available through purchase, exchange or subscription.

## **Sign up**

The unit price of the journal is 8.000 Colombian pesos (the price does not include shipping). The annual sign up is 21.000 Colombian pesos, 20 USD in Latin America and the Caribbean, 30 USD in other regions (the price includes shipping).

## **Reproducción**

The total or partial reproduction of the papers of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal or the District University.

## **Dirección postal**

### **Prof. Fredy H. Martínez S.**

Editor and director Tekhnê journal

Journals Room, Block 5, Office 301

Technological Faculty

District University Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A-35 sur

Phone: (571) 3238400 Ext. 5003

---

# Declaración de ética y buenas prácticas

## T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Revista Tekhnê

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

El comité editorial de la revista *Tekhnê* está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

### Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de *Tekhnê* se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

### Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

### Relaciones con los autores

*Tekhnê* se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista.

La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales.

Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluían graves circunstancias.

### Relaciones con los evaluadores

*Tekhnê* pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

### Proceso de evaluación por pares

*Tekhnê* garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

### Reclamaciones

*Tekhnê* se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

### Fomento de la integridad académica

*Tekhnê* asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

### Protección de datos individuales

*Tekhnê* garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

### Seguimiento de malas prácticas

*Tekhnê* asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

---

### **Integridad y rigor académico**

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

### **Relaciones con los propietarios y editores de revistas**

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. *Tekhnê* garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

### **Conflicto de intereses**

*Tekhnê* establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

### **Quejas/denuncias**

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes.

---

# Code of ethics and good practice

## T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Tekhnê journal  
District University Francisco José de Caldas  
Technological Faculty

The editorial board of *Tekhnê* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

### General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, *Tekhnê* committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.

### Relations with readers

Readers will be informed about who has funded the research and their role in the research.

### Relations with authors

*Tekhnê* is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line.

The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions.

Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

### Relations with evaluators

*Tekhnê* makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

### Peer review process

*Tekhnê* ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

### Claims

*Tekhnê* is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

### Promoting academic integrity

*Tekhnê* ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

### Protection of individual data

*Tekhnê* guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

### Tracking malpractice

*Tekhnê* accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

### Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.



---

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

#### **Relations with owners and journal editors**

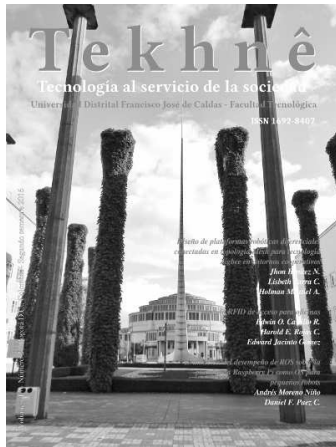
The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. *Tekhnê* will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

#### **Conflict of interest**

*Tekhnê* will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

#### **Complaints/allegations**

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.



Volumen 13 - Número 2 - 2016  
ISSN 1692-8407

## Índice

<b>I</b>	<b>Declaración de ética y buenas prácticas</b>	<b>6</b>
<b>II</b>	<b>Code of ethics and good practice</b>	<b>8</b>
<b>III</b>	<b>Editorial</b>	<b>11</b>
<b>IV</b>	<b>Artículos</b>	<b>13</b>
1.	<b>Diseño de plataformas robóticas diferenciales conectadas en topología Mesh para tecnología Zig-bee en entornos cooperativos</b> <i>Jhon Benitez N.</i> <i>Lisbeth Parra C.</i> <i>Holman Montiel Ariza</i>	<b>13</b>
2.	<b>Modulo RFID de acceso para oficinas</b> <i>Edwin O. Castillo R.</i> <i>Harold E. Rojas C.</i> <i>Edwar Jacinto Gómez</i>	<b>19</b>
3.	<b>Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana</b> <i>Andrés F. García G.</i> <i>Andrés J. Becerra</i>	<b>27</b>
4.	<b>Sistema de control difuso para motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) sobre hardware embebido</b> <i>Jhon Jairo Galvis López</i> <i>José Iván Madrid V.</i>	<b>43</b>
5.	<b>Robot semi-autónomo para el transporte de pacientes con movilidad reducida</b> <i>Óscar E. González R.</i> <i>Diego Mauricio Acero Soto</i>	<b>49</b>
<b>V</b>	<b>Instrucciones para los autores</b>	<b>64</b>
<b>VI</b>	<b>Instructions for authors</b>	<b>66</b>

---

# Editorial

**H**A finalizado un nuevo proceso de reconocimiento y medición de grupos de investigación colombianos por parte de Colciencias. A lo largo de este recorrido la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital, casa de esta revista científica, poco a poco ha aumentado sus índices, y por tanto su nivel a los ojos de la sociedad.

En ésta última convocatoria (Convocatoria 737 de 2015) aplicaron un total de 5.796 grupos, de los cuales 4.434 cumplieron con todas las condiciones exigidas para ser reconocidos. La distribución final de grupos reconocidos y categorizados fue la siguiente:

- Grupos A1: 382 (8.62 %)
- Grupos A: 546 (12.31 %)
- Grupos B: 977 (22.03 %)
- Grupos C: 1.848 (41.68 %)
- Grupos D: 681 (15.36 %)

Como se observa, cerca de la mitad de los grupos se han categorizado en el nivel C, y menos del 10 % están en el nivel más alto (A1). Los resultados finales para la Facultad Tecnológicas son los siguientes:

- Total de grupos categorizados: 22
- Grupos A1: 0 (0 %)
- Grupos A: 3 (13.64 %)
- Grupos B: 2 (9.09 %)
- Grupos C: 14 (63.63 %)
- Grupos D: 3 (13.64 %)

Esta distribución es bastante cercana al comportamiento nacional. La no existencia de grupos A1 es natural, dado que la Facultad Tecnológica por misión no posee programas de doctorado, lo cual reduce los productos necesarios. El porcentaje de grupos C es un poco superior al nacional, lo que podría ser negativo para avanzar a las categorías altas. Sin embargo, esto solo afecta marginalmente la categoría B, dado que el porcentaje de grupos A es estadísticamente el mismo nacional. Esto es un gran logro para la Facultad, y evidencia el fuerte trabajo en investigación de su cuerpo de docentes, lo cual resulta ser aún mas importante si se considera la seriedad y esfuerzo con el cual se ha verificado en esta oportunidad la existencia de los productos reportados.

De parte de la revista expresamos nuestras felicitaciones, y deseos para que estos logros sean aún más visibles para toda la comunidad universitaria.

Ph.D(c) Prof. Fredy H. Martínez S.  
Docente Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

---

# Editorial

**C**OLCIENCIAS has completed a new process of recognition and measurement of Colombian research groups. Along this route the Technological Faculty of the District University, home of this scientific journal, has gradually increased its indexes, and therefore its level in the eyes of society.

In this last call (737 of 2015) applied a total of 5.796 groups, of which 4.434 met all the conditions required to be recognized. The final distribution of recognized and categorized groups was as follows:

- Groups A1: 382 (8.62 %)
- Groups A: 546 (12.31 %)
- Groups B: 977 (22.03 %)
- Groups C: 1,848 (41.68 %)
- Groups D: 681 (15.36 %)

As noted, about half of the groups have been categorized at level C, and less than 10 % are at the highest level (A1). Final results for the Technological Faculty are:

- Total categorized groups: 22
- Groups A1: 0 (0 %)
- Groups A: 3 (13.64 %)
- Groups B: 2 (9.09 %)
- Groups C: 14 (63.63 %)
- Groups D: 3 (13.64 %)

This distribution is quite close to national behavior. The absence of A1 groups is natural, since the Technological Faculty by mission does not have doctoral programs, which reduces the necessary products. The percentage of groups C is slightly higher than the national, which could be negative to advance to the high categories. However, this only marginally affects category B, since the percentage of groups A is statistically the same national. This is a great achievement for the Faculty, and it shows the strong research work of its faculty, which is even more important considering the seriousness and effort with which it has verified in this opportunity the existence of products.

From the journal we express our congratulations, and wishes for these achievements to be even more visible to the entire university community.

Ph.D(c) Prof. Fredy H. Martínez S.  
Technological Faculty  
District University Francisco José de Caldas

# Diseño de plataformas robóticas diferenciales conectadas en topología Mesh para tecnología Zigbee en entornos cooperativos

*Differential wheeled robotic platforms design in Mesh topology for connected Zigbee technology in cooperative environments*

Jhon J. Benitez N.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
jjbenitezn@correo.udistrital.edu.co

Lisbeth J. Parra C.

Teshboss SAS  
ljparrac@correo.udistrital.edu.co

Holman Montiel A.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
hmontiela@udistrital.edu.co

---

Este artículo muestra el desarrollo de un sistema de navegación basado en robótica tipo enjambre con un computador y tres plataformas diferenciales. El computador actúa como coordinador y las plataformas como routers haciendo uso del protocolo de comunicación ZigBee. Por medio de los módulos X-bee serie 2, un sensor ultrasónico y un odómetro, se estructura un esquema de control cooperativo con una interfaz gráfica configurable para el control de individual de los robots. El sistema se validó sobre prototipos reales demostrando un alto desempeño y versatilidad de uso.

*Palabras clave:* Comunicación, datos, mesh, robótica de enjambres

This paper shows the development of a navigation system based on swarm robotic with a computer and three differential wheeled platforms. The computer acts as a coordinator and platforms as routers using the ZigBee communication protocol. Through the X-bee series 2 modules, an ultrasonic sensor and an odometer, we structure a cooperative control scheme with a configurable graphical interface for the individual control of the robots. The system was validated on real prototypes demonstrating high performance and versatility of use.

*Keywords:* Communication, data, mesh, swarm robotics

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Noviembre 4, 2016

**Fecha aceptación del manuscrito:** Diciembre 5, 2016

**Investigación financiada por:** Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

**Cómo citar:** Benitez, J., Parra, L. y Montiel, H. (2016). *Diseño de plataformas robóticas diferenciales conectadas en topología Mesh para tecnología Zigbee en entornos cooperativos*. Revista Tekhnê, 13(2), 13-18.

## Introducción

La robotica tipo enjambre se basa en la coordinación y desarrollo de un trabajo conjunto entre robots simples para llegar a un fin concreto cooperativo sin tener que realizar tareas largas. De esta manera se logra mejorar los tiempos de respuesta en la ejecución del proceso establecido. Se toma como ejemplo principal el comportamiento de algunos insectos, como las hormigas, o la función desarrollada por las células en los seres vivos. En la actualidad, esta área de investigación tipo enjambres ha tomado gran fuerza debido a las ventajas obtenidas respecto a la ejecución y simplicidad en los dispositivos (Sempere y Mireia, 2014).

Teniendo en cuenta las ventajas de la robotica tipo enjambre, se diseñaron tres plataformas roboticas diferenciales con dos sensores de navegación (odómetro y ultrasonido). Estas plataformas están conectadas a una red tipo Mesh, basada en el protocolo Zigbee, usando módulos XBEE S2 (Martinez S. y Delgado, 2012). Esta estructura permite la creación de un entorno cooperativo.

Se diseñó una interfaz gráfica que permite controlar las plataformas que conforman el sistema siguiendo tres pasos: en primer lugar, escoger la plataforma que se desea mover. En segundo lugar, ingresar la dirección del movimiento o la lectura del sensor, y por último, asignar la distancia a recorrer. Adicionalmente, la interfaz permite visualizar un mensaje de respuesta por parte del sistema.

Cada plataforma tiene integrada una tarjeta Arduino UNO que se encarga de la recepción e interpretación de la trama de datos con el fin de generar el movimiento definido para la plataforma. Sin embargo, el movimiento se ejecutará si y solo si el sensor de ultrasonido no detecta obstáculos en la distancia suministrada. En la Fig. 1 se muestra un diagrama del funcionamiento del sistema.

## Metodología

### Diseño de la topología Mesh

En el diseño de la topología tipo Mesh se implementaron cuatro módulos XBEE S2 configurados en modo AT (comunicación AT, configuración transparente, sin codificación), para la ejecución del proyecto, y en modo API (comunicación API, transmisión empaquetada que permite identificar el emisor, configurar y monitorear remotamente (Digi International, 2009)), para la visualización de la red. Tres de estos módulos actúan como *Routers* y el restante tiene el rol de *Coordinator*. Todos estos tienen configuración tipo *broadcast* permitiendo la comunicación total entre todos los dispositivos. En la Fig. 2 se detalla la estructura de comunicación de la topología tipo Mesh en el software X-CTU.

## Broadcast

Los módulos XBEE permiten tener una conexión punto a punto o multipunto. En este caso se realizó una configuración multipunto o *broadcast* que consiste en transmitir datos desde un elemento de la red a todos los dispositivos conectados a esta de forma simultánea y sin necesidad de hacer el envío uno a uno. Esta configuración se realizó en el programa X-CTU que, a su vez, permitió verificar el funcionamiento correcto de la red (Mayalarp, Limpaswadpaisarn, Poombansao, y Kittipiyakul, 2010).

En la tabla 1 se muestra la versión de *firmware* utilizada para cada uno de los módulos con su respectiva dirección.

Tabla 1  
Configuración de red para los módulos.

ESTRUCTURA DE FIRMWARE				
Nodo Identificador	Firmware	Dirección de red	Número Serial en Alto	Número Serial en bajo
COORDINADOR	20A7	1996	0013A200	40E429AC
ROUTER 1	22A7	1996	0013A200	40F49EEC
ROUTER 2	22A7	1996	0013A200	40AEBAB1
ROUTER 3	22A7	1996	0013A200	40AEB9C

Como se observa en la tabla 1, el Coordinador tiene la versión de *Firmware* 20A7 y los *Routers* cuentan con la versión 22A7. Estas son las últimas versiones disponibles a la fecha del software. Se muestran también las direcciones físicas de cada uno de los dispositivos y la dirección de la red o PAN ID, la cual es la misma en todos los módulos para poder lograr una comunicación transparente y eficaz en la red.

En las Figs. 3, 4, 5 y 6 se evidencia la apropiada configuración de *broadcast* y de direccionamiento de cada módulo.

SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40E429AC
MY 16-bit Network Address	FFFE
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	FFFF
NI Node Identifier	COORDINADOR

Figura 3. Direccionamiento y configuración de *broadcast* para módulo Coordinador. Tomada de X-CTU.

En las figuras se corrobora la información anteriormente expuesta en la tabla 1, y se muestra la dirección de destinatario. En esta última se debe digitalizar la dirección física del dispositivo con el que se desea comunicar, y así realizar una conexión punto a punto. Para realizar una conexión tipo *broadcast* se escoge como dirección en alto (*Destination Address High*) 0000 y como dirección en bajo (*Destination Address Low*) FFFF, ya que, de esta manera,

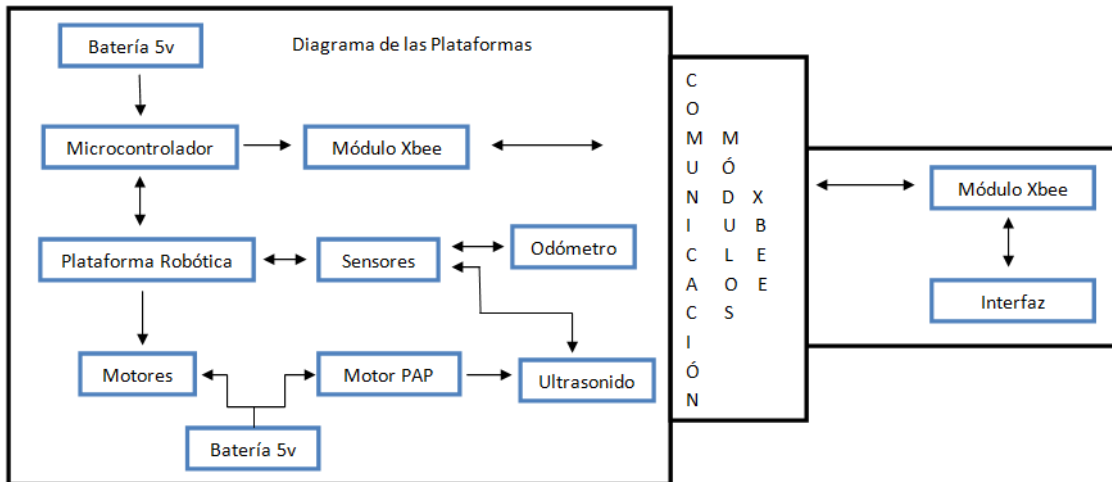


Figura 1. Diagrama de funcionamiento de la plataforma robotica.

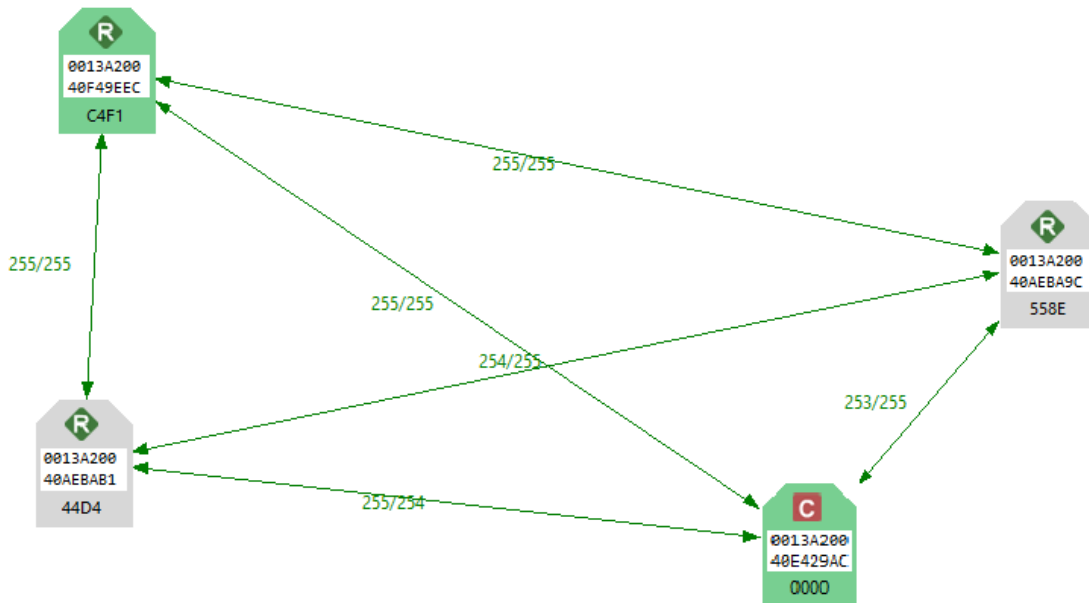


Figura 2. Red de comunicación.

SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40F49EEC
MY 16-bit Network Address	CE22
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	FFFF
NI Node Identifier	ROUTER1

Figura 4. Direcccionamiento y configuración de broadcast para módulo Router1. Tomada de X-CTU.

SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40AEB9C
MY 16-bit Network Address	393A
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	FFFF
NI Node Identifier	ROUTER2

Figura 5. Direcccionamiento y configuración de broadcast para módulo Router2. Tomada de X-CTU.

SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40AEBAB1
MY 16-bit Network Address	97BE
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	FFFF
NI Node Identifier	ROUTER3

Figura 6. Direccionamiento y configuración de *broadcast* para módulo Router3. Tomada de X-CTU.

el módulo identifica que la comunicación es para todos los dispositivos de la red.

### Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utilizó un sensor de ultrasonido HC-SR04, el cual permite detectar obstáculos a una distancia de entre 4 y 300 cm, con un ángulo de proyección de 40 grados en la dirección en la que se encuentra. Su rango de funcionamiento de muestra en la Fig. 7.

Para garantizar que los robots no colisionen y que puedan realizar un movimiento óptimo, el sensor ultrasónico cambia su posición inicial gracias a un motor paso a paso (PAP) que genera movimientos entre 17 y 20 grados por pulso. Esto garantiza que el sensor cubra un mayor ángulo de visión en su posible desplazamiento.

Con el fin de validar el funcionamiento de la plataforma, se diseñó un programa en la tarjeta Arduino UNO para activar el sensor y hacer que este emita un sonido a una frecuencia no audible. La tarjeta recibe un pulso en el momento en el que el sensor detecta de vuelta el sonido y determina así el tiempo entre el envío y el retorno del sonido. Este tiempo se utiliza con el fin de obtener la distancia entre el sensor y el obstáculo más cercano (ecu. 1).

$$distancia = \frac{tiempo}{58 \frac{s}{cm}} \quad (1)$$

También se implementó un odómetro por medio de un encoder rotatorio en cada llanta, el cual está compuesto por un emisor infrarrojo, un sensor infrarrojo y un disco con ranuras. El sensor infrarrojo ve interrumpida la luz emitida por el emisor, a causa del constante movimiento del disco con ranuras. La tarjeta Arduino cuenta los pulsos producidos por dichas interrupciones, dato con el cual es posible establecer la cantidad de vueltas de la llanta. Se hace uso de la ecu. 2 para calcular la distancia recorrida por la plataforma.

$$distancia_{robot} = vueltas_{llanta} \times 22 \text{ cm} \quad (2)$$

### Implementación de módulos XBee

A través de una conexión Rx/Tx entre el módulo y la Arduino UNO, se logró el correcto funcionamiento de la red. Para realizar el envío de datos, se diseñó un protocolo de empaquetamiento, el cual tiene como objetivo controlar la recepción de datos en la tarjeta y de esta manera poder entender cada uno de los caracteres recibidos.

**Empaquetamiento.** El empaquetamiento diseñado consiste en iniciar la cadena de datos con el símbolo @ y finalizarla con el símbolo #. Esto, para garantizar que la trama llegue completa y que no se reciba información no deseada. En la Fig. 8 se puede observar el modo idóneo de enviar el mensaje.

@P1A100#

Figura 8. Modo de empaquetamiento.

Como se observa, la cadena de datos está compuesta por 8 bytes. A continuación se describe la función específica de cada byte.

- @: Byte de Inicio.
- P1: Bytes de selección de plataforma (P1, P2 ó P3).
- A: Bytes de selección de dirección o lectura de sensor (A, R, D, I, S).
- 100: Bytes de distancia a recorrer en cm.
- #: Byte de finalización.

### Interfaz

El desarrollo de la interfaz se realizó en JAVA. El IDE seleccionado fue NetBeans versión 8.2. La comunicación serial realizada fue permitida gracias a la librería Giovynet Driver 2.0, la cual se define como: *un marco de trabajo o framework que posibilita el uso de lenguaje Java para crear aplicaciones que se comuniquen con circuitos externos al PC.* Como se pudo observar en el proyecto, esta librería permitió la transmisión bidireccional de datos de forma limpia y eficaz con las plataformas robóticas. A continuación, se muestran los pasos realizados para el diseño de la interfaz.

1. Instalación de la librería Giovynet Driver 2.0.
2. Validación de puertos COM permitidos.
3. Implementación de botones, cajas de texto, etiquetas, etc.
4. Creación del código para la transmisión de datos.
5. Creación del código para la recepción de datos.
6. Visualización de los datos recibidos.

En la Fig. 9 se muestra la interfaz diseñada, la cual está compuesta por:

- 2 *combobox* que facilitan la selección de la plataforma requerida junto con la acción que se desea ejecutar.



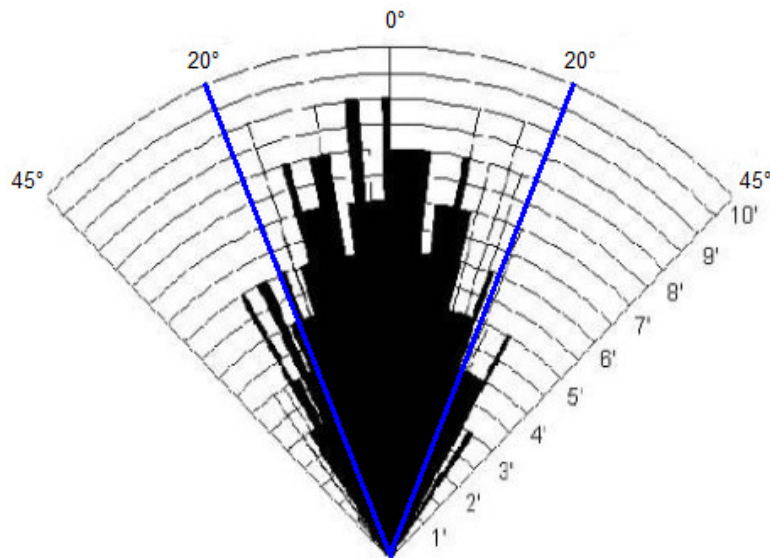


Figura 7. Lóbulo radiado sensor HC-SR04, suministrada por el fabricante, editada por los autores (Allnet, 2014).

- 4 *textbox* de los cuales uno permite realizar la digitación de la distancia a recorrer en centímetros y los otros tres muestran la respuesta obtenida por la plataforma seleccionada.
- 1 *button* que da inicio a la transmisión y a la recepción de datos.
- 7 *labels* que proporcionan una ayuda para el usuario con el fin de garantizar el buen manejo de la interfaz.

usuario lo desee, a través de un mensaje transmitido por los módulos XBee S2 que se encuentran conectados en una red tipo Mesh por medio de la topología Zigbee. Esta red de comunicación se basa en una configuración tipo *broadcast* que permite la transmisión de datos a todos los dispositivos de la red. A continuación, se muestran las diferentes pruebas y sucesos que permitieron el buen funcionamiento de los dispositivos.

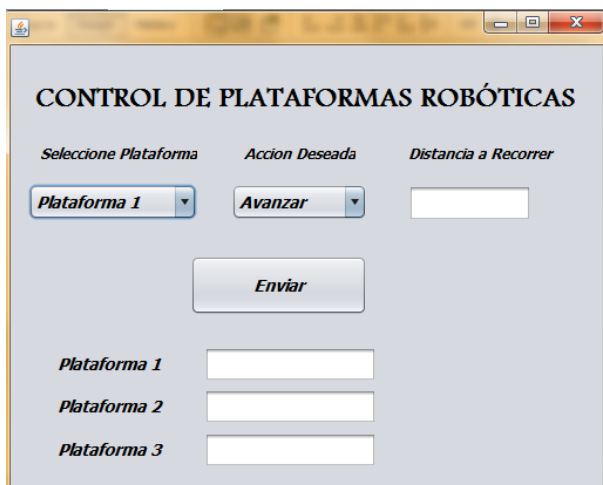


Figura 9. Interfaz gráfica en Java.

### Pruebas y resultados

En el presente documento se mostró el desarrollo de un sistema de navegación que tiene como función principal analizar un espacio determinado en el momento en que el

Al realizar las pruebas de comunicación con los robots se obtuvieron diferentes tiempos de respuesta dependiendo de la distancia entre los módulos y los objetos de interferencia encontrados. El rango aproximado de respuesta fue de 9 a 11 segundos por robot. Este retardo se debe al movimiento que debe realizar el motor PAP para que el sensor tenga mayor rango de visión, como se muestra en la Fig. 10.

Como se puede apreciar en la Fig. 10, el retardo entre los pulsos del motor es de 500 ms. Para realizar un giro de 180 grados es necesario generar 10 pulsos en el motor, esto conlleva a que el retardo total de este movimiento sea la multiplicación entre el retardo y la cantidad de pulsos, para, de esta forma, generar un retardo total de 5 segundos. Para el retorno a la posición inicial del motor PAP se implementó el código que se muestra en la Fig. 11.

Se observa en la Fig. 11 que el retardo entre los pulsos del motor es de 100 ms. Para realizar el retorno es necesario generar 10 pulsos en el motor, por lo que al realizar el mismo proceso anterior, se obtiene un retardo final de 1 segundo para este movimiento. El proceso de la adquisición de datos toma un tiempo estimado de 6 segundos, y el proceso de transmisión y recepción de estos varía entre 2 y 5 segundos,

```

void derecha(){
  for (a=0 ; a<3 ; a++){
    switch (a) {
      case 0:
        digitalWrite(bobina0,HIGH); delay(500);
        digitalWrite(bobina0,LOW); b=b+1;
        ultrasonido();
        break;
      case 1:
        digitalWrite(bobina1,HIGH); delay(500);
        digitalWrite(bobina1,LOW); b=b+1;
        ultrasonido();
        break;
      case 2:
        digitalWrite(bobina2,HIGH); delay(1000);
        digitalWrite(bobina2,LOW); b=b+1;
        ultrasonido();
        break;
    }
    while (b==10){
      a=8; b=11; e=1;
      mySerial.println(prueba);
      digitalWrite(bobina2,LOW);
      digitalWrite(bobina1,LOW);
      digitalWrite(bobina0,LOW);
    }
  }
}

```

Figura 10. Fragmento de código usado para el movimiento del motor PAP.

```

void izquierda(){
  for (c=0 ; c<3 ; c++){
    switch (c) {
      case 0:
        digitalWrite(bobina2,HIGH); delay(100);
        digitalWrite(bobina2,LOW); d=d+1;
        break;
      case 1:
        digitalWrite(bobina1,HIGH); delay(100);
        digitalWrite(bobina1,LOW); d=d+1;
        break;
      case 2:
        digitalWrite(bobina0,HIGH); delay(100);
        digitalWrite(bobina0,LOW); d=d+1;
        break;
    }
    while (d==10){
      c=0;
      d=0;
      f=1;
      digitalWrite(bobina2,LOW);
      digitalWrite(bobina1,LOW);
      digitalWrite(bobina0,LOW);
      Serial.print('\n');
    }
  }
}

```

Figura 11. Fragmento de código usado para el retorno del motor PAP.

dependiendo de la distancia y los objetos que interfieren en la línea de transmisión de datos.

Para la validación de la comunicación se realizaron envíos de mensajes de prueba en los diferentes módulos como se muestra en la Fig. 12.

```

70 72 75 65 62 61 20
72 6F 75 74 65 72 20 31
72 6F 75 74 65 72 20 32

```

Figura 12. Cadena de prueba transmitida.

Se consideran en la Fig. 12 tres cadenas en hexadecimal. La cadena azul hace referencia a la transmisión de datos realizada por el coordinador de la red, y las cadenas en color rojo hacen referencia a los datos recibidos por el mismo. Con esto se muestra la comunicación bidireccional y limpia a través de la red.

## Conclusiones

Se creó un algoritmo como alternativa de solución para recibir, desempaquetar y comparar la información transmitida por los módulos. Esto se realiza con el fin de determinar el momento en el que se debe realizar la lectura del sensor ultrasónico, y seguido de esto, generar un movimiento en la plataforma. A través del uso de la interfaz gráfica, desarrollada en Java, se puede realizar el control del sistema de navegación, permitiendo escoger la dirección y la distancia a recorrer por los robots. Se puede evidenciar en la topología Mesh que al conectar una gran cantidad de dispositivos se permite una comunicación con mayor alcance. En caso de presentar alguna anomalía en el entorno, se procede a buscar canales recurrentes para la transmisión de datos.

## Referencias

- Allnet. (2014). *Dyp serial ultrasonic sensor*. On line.
- Digi International. (2009). *XBee/XBee-PRO RF Modules*. On line. 11001 Bren Road East, Minnetonka, MN 55343. (Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol)
- Martinez S., F. H., y Delgado, J. (2012, January). Wireless visual sensor network robots-based for the emulation of collective behavior. *Revista Tecnura*, 16(31), 10-18. (ISSN 0123-921X)
- Mayalarp, V., Limpaswadpaisarn, N., Poombansao, T., y Kittipiyakul, S. (2010). Wireless mesh networking with xbee. En *2nd ecti-conference on application research and development (ecti-card 2010)* (p. 1-5).
- Sempere, T., y Mireia, L. (2014). *Agentes y enjambres artificiales: modelado y comportamientos para sistemas de enjambre roboticos*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad de Alicante. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial.



## Modulo RFID de Acceso para oficinas

*RFID module for office access*

Edwin O. Castillo R.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Harold.rojas0510@gmail.com

Harold E. Rojas C.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

edwincastillo45@hotmail.com

Edwar Jacinto G.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

ejacintog@udistrital.edu.co

---

En la oficina de la empresa Kimbaya Technology S.A.S existía la necesidad de implementar un sistema de acceso automático que optimizara el tiempo y las funciones de sus empleados. Por ello, se desarrollo un control de acceso, un módulo con la tecnología RFID en el que cada funcionario de la oficina cuenta con su propio *Tag* o tarjeta RFID UHF tipo carné, el cual posee un código específico y único. Debido a que se trabajó con UHF, el sistema permite una lectura a una distancia entre 60 cm y 1 m, sin necesidad de que exista una proximidad estrecha entre el lector y el *Tag*.

*Palabras clave:* RFID, Tag RFID, UHF, Cliente-Servidor, TCP/IP.

In the Kimbaya Technology S.A.S office there was the necessity of implement an automatic access system that optimized the employees time and tasks. That is why it was developed an access control, a module with RFID technology which each person of the office has their own RFID UHF Tag as a license that has a specific and unique code. Due to worked with UHF, the system let to read to a distnace between 60 cm and 1 m, without the necessity of a close proximity between the reader an the Tag.

*Keywords:* RFID, RFID tag, UHF, customer-server, TCPI/IP.

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Noviembre 4, 2016

**Fecha aceptación del manuscrito:** Diciembre 5, 2016

**Investigación financiada por:** Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

**Cómo citar:** Castillo, E., Rojas, H. y Jacinto, E. (2016). *Modulo RFID de Acceso para oficinas*. Revista Tekhnê, 13(2), 19-26.

## Introducción

Durante las últimas décadas la tecnología ha tenido una evolución exponencial. En relación con las tecnologías aplicadas a la seguridad, no solo la seguridad de espacios sino en general a la protección de los bienes y recursos de las personas tanto materiales como intelectuales, son muchos los desarrollos que se han implementado recientemente.

Dentro de los sistemas de seguridad se ven involucradas dos tipos de tecnologías (Casar, 2005): las tecnologías para la identificación fácil y viable usada tanto en el mundo virtual como en el real para la identificación no solo de personas sino también de animales u objetos, y las tecnologías para el control de acceso, que limitan el acceso a dispositivos, sistemas, recintos o espacios físicos única y exclusivamente a las personas autorizadas para hacerlo (Park, Lee, Kim, Chung, y Sohn, 2006).

Teniendo en cuenta que en la oficina de la empresa Kimbaya no se tenía un sistema moderno y autónomo para el ingreso a las personas autorizadas, en este caso los empleados, se implementó un sistema que les permitiera ingresar de forma automática. Para ello se utilizó la tecnología RFID, tecnología que se ha implementado en diferentes sectores de la industria como logística, identificación, seguridad, entre otros (Shafin et al., 2015).

Debido a que se manejaron dispositivos pasivos, el lector es quien da la energía a los *Tags*, enviando periódicamente señales a través de un campo electromagnético. La señal que llega a la tarjeta es detectada por una antena interna e induce una corriente eléctrica pequeña pero suficiente para operar el circuito integrado de la misma (Want, 2006).

Como estrategia de solución se utilizó un lector RFID UHF junto con una antena RFID UHF que proporciona distancias de lecturas entre 5 cm y 120 cm, según como se configure la potencia de salida y la sensibilidad del puerto de antena del lector. El puerto se configura dentro del *Middleware* instalado en el lector, que a su vez, es el encargado de configurar el lector para indicarle de qué forma leer el código programado en el carné RFID UHF, que potencia suministra a la antena conectada o antenas conectadas y la forma en la cual el lector envía cada lectura realizada.

En vista que la tecnología RFID está compuesta por cuatro elementos fundamentales que son el *Tag*, antena, lector y sistema de respaldo, se desarrolló un aplicativo bajo el lenguaje de programación C#, con el cual se incorporó un hilo de ejecución asíncrono también conocido como *Multithreaded*, con el propósito de recibir la información que entrega el lector mediante comunicación cliente-servidor bajo el protocolo TCP/IP, y realizar la conexión a la base de datos encargada de almacenar la información. Esto se hace para que la interacción con la parte visual no se vea afectada y tenga una fluidez adecuada. De igual forma, en este aplicativo se tiene las opciones de verificar conexión

con el lector y el microcontrolador encargado de activar o desactivar el electro imán, ver el historial de entradas hasta ocho horas atrás, filtrar los registros por fecha y hora y de gestionar usuarios como lo sería crear, editar o eliminar.

## Formulación del problema

En Colombia más que avances e innovaciones tecnológicas, se han hecho estudios sobre las ventajas y oportunidades que ofrece la implementación de sistemas RFID en diferentes áreas comerciales y domésticas, además de la implementación de diferentes sistemas de control de acceso a través de esta tecnología de identificación por radiofrecuencia.

Históricamente es sabido que la tecnología RFID ha tenido mayor acogida dentro de las tecnologías en diferentes mercados con diferentes aplicaciones dependiendo de las necesidades y requerimientos de los mismos. En la tabla 1 se detallan las diferentes aplicaciones que comúnmente se encuentran para la implementación de sistemas RFID dependiendo de la frecuencia que se maneje.

Tabla 1  
*Aplicaciones de la tecnología según las frecuencias de trabajo.*

Frecuencia de trabajo	Aplicaciones usuales
LF:135 KHz	Control de acceso Identificación de animales Control antirrobo en coches
HF: 13,56 MHz	Control de acceso Bibliotecas y control de documentación Pago en medios de transporte Control de equipaje en aviones
UHF: 860 - 960 MHz	Cadenas de suministro Trazabilidad de objetos de valor Control anti falsificación Automatización de las tareas de inventariado Pago de peaje en autopistas
Microondas: 2,4GHz, 5,8 GHz	Pago de peaje en autopistas Rastreo de vehículos

Recientemente la integración de sistemas RFID en la salud se ha incrementado considerablemente. Explotando sus características y posibilidades, esta tecnología tiene el potencial de proporcionar un mejor servicio a los pacientes. Por lo tanto, un manejo apropiado de la tecnología RFID podría mejorar la calidad de los procesos médicos haciendo el cuidado del paciente más seguro y consistente. Tal es el caso de la implementación de RFID para un sistema de manejo de medicinas dentro de la casa desarrollado por la universidad de Kun-Shan en Taiwán. Allí se desarrolló un seguimiento de las medicinas en el que cada persona tiene su tarjeta de alta frecuencia (HF) para poder acceder a los medicamentos, y que junto a una cámara se completa el sistema de control asegurándose de identificar la persona que está acercándose a tomar los medicamentos y confirmando cual medicamento es el que está adquiriendo el usuario.

En Taiwán en el 2012 la universidad de Yuan Ze desarrolló un perfil o prototipo de antena polarizada circularmente de bajo perfil a través de UHF para la aplicación de un lector de RFID, concluyendo que al usar antenas polarizadas circularmente se lograba establecer una comunicación mucho más estable entre el lector y las tarjetas, usando frecuencias entre 845 MHz y 964 MHz con menos de 10 dB logrando alta impedancia del ancho de banda (Huang, Hsu, y Jhang, 2012).

La información se hace más difícil de detectar cuando la tarjeta se encuentra ligada a un objeto móvil o una persona. Actualmente se usa un sistema de ensayo error para decidir las mejores condiciones para detectar las tarjetas, teniendo en cuenta algunos factores externos que pueden afectar la detección. Por ello, un grupo de miembros de la IEEE desarrolló un método de predicción inteligente del rango de detección usando un soporte de máquinas de vectores el cual mejora sobremanera el anterior método de ensayo error, con un enfoque en el que predice la detección de la tarjeta, teniendo en cuenta los diferentes factores que se puedan presentar como interferencia.

### Metodología

#### Desarrollo del modulo RFID para el acceso a la oficina

Para esta aplicación, aunque existen diferentes formas y tipos de tecnología ya implementadas en los sistemas de acceso automatizados como lo son tarjetas de proximidad que trabajan en frecuencias LF o HF, sistemas biométricos, analizadores de imágenes o con clave de acceso, se escogió la tecnología RFID UHF para la captación de datos debido a que es una tecnología nueva e innovadora que permitió identificar de forma rápida y efectiva a una distancia amplia el carné asignado a cada funcionario de la empresa Kimbaya, los cuales se encuentran codificados con un serial único e irrepetible escogido por la misma empresa, impidiendo que quizás carnés u otro tipo de *Tags* de otras empresas que se encuentran en el edificio que utilicen la misma tecnología lleguen a tener el mismo código logrando ingresar.

Además de la ventaja de que permite una lectura rápida y a distancias mayores a las que nos brindan otras tecnologías, nos permite tener una vida útil del carné RFID UHF de más de 20 años o casi infinita según algunos fabricantes, debido a que los carnés son elementos pasivos que no poseen ningún tipo de batería puesto que el lector junto con la antena RFID UHF son los encargados de darle la energía al chip del carné como se había explicado anteriormente y asimismo establecer el canal de comunicación tal como se puede observar en la Fig. 1.

Pero como los componentes básicos para un sistema RFID UHF son *Tag*, Antena, Lector y Sistema de respaldo. Se desarrolló un software bajo el lenguaje de programación C# el cual es un lenguaje intuitivo, dentro del cual encontramos

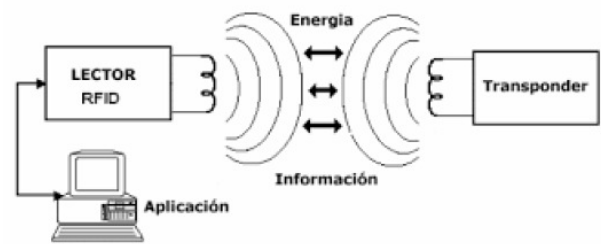


Figura 1. Diagrama OSPF con sus respectivas áreas.

gran cantidad de información y que permite una gran versatilidad de protocolos de comunicación para interactuar con una gran variedad de dispositivos y programas. En este caso, usando el protocolo TCP/IP y la comunicación Ethernet con la tarjeta Arduino.

Dentro de este desarrollo, lo primero que se establece es la comunicación TCP/IP con el lector RFID UHF, la cual nos va a permitir que la conexión se haga mediante un cable de red que se puede extender hasta 100 m, permitiendo que el lector no deba estar cercano al ordenador donde se esté ejecutando el programa.

Una vez establecida la comunicación se captura la información suministrada por el lector en cada lectura para de esta forma realizar el procesamiento de datos e identificar si el código leído y suministrado por el lector se encuentra registrado en la base de datos. Al encontrarse registrado se establece conexión mediante el protocolo cliente-servidor con el microcontrolador el cual se encuentra a la espera del mensaje HTTP que le indique que debe desactivar el electro imán para permitir el ingreso al empleado.

En la figura 2 podemos observar el diagrama de bloques del diseño y funcionamiento general del sistema.

#### Desarrollo de la interfaz gráfica y comunicación del sistema

Para el desarrollo del sistema de una manera eficiente fue necesario establecer dos parámetros primordiales en el desarrollo del mismo. El primero fue el tipo de comunicación que se habría de utilizar en la implementación de lo esperado; y el segundo cómo habría de desarrollarse la interfaz gráfica de manera que esta interactuará de manera amigable con el usuario facilitando la consulta de cualquier parámetro como lo sería:

- Ingresos recientes.
- Parámetros configurados de comunicación: IP del lector RFID UHF, puerto de comunicación TCP/IP del lector RFID UHF, IP del microcontrolador y puerto digital conectado al relé encargado de desactivar el electro imán.
- Usuarios registrados en el sistema.
- Permitir crear, editar o eliminar usuarios.
- Filtrar los registros por fecha y por hora.

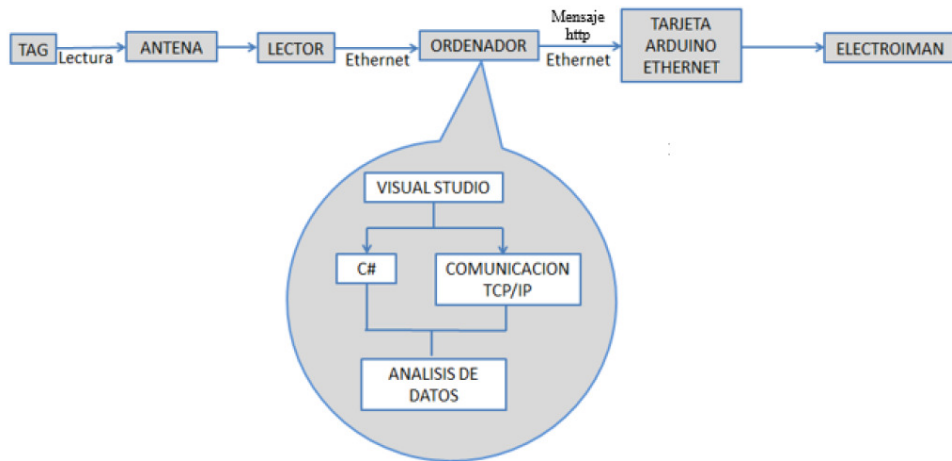


Figura 2. Diagrama de bloques del procedimiento de diseño del software y hardware del módulo RFID para el acceso a la oficina.

Para la parte de comunicación se estableció que la comunicación entre el lector y el programa para la captura de las lecturas sería bajo el protocolo TCP/IP y la comunicación entre el programa y el microcontrolador sería mediante una conexión cliente servidor.

Para la interfaz gráfica se realizaron cuatro pestañas de visualización que le permiten al usuario visualizar los ingresos recientes, la configuración de los datos para conexión con el lector y con el microcontrolador, los usuarios registrados y el historial de registros por fecha y hora como se muestra en las Figs. 4, 5, 6, y 7.

Como se observa en la Fig. 4, en esta pestaña se visualiza:

- Hora actual.
- *Checkbox* para iniciar las lecturas: este se activa para establecer la conexión con el lector.
- Tiempo de visualización: este permite visualizar hasta ocho horas atrás de los ingresos realizados.
- Tabla de los ingresos recientes: en esta tabla se observan los ingresos recientes según se tenga configurado en el *dropdown* de tiempo de visualización.

El funcionamiento de esta pestaña está descrito por el esquema de la Fig. 8:

**Pestaña configuración.** En esta pestaña se visualiza:

- Nombre del Lector: Este nombre se pone en el archivo de configuración.
- IP del Lector: Es la IP que tiene configurada el lector RFID UHF.
- Puerto TCP/IP: Puerto por el cual se establece la comunicación entre el Programa y el Lector.
- IP GPIO: IP que tiene configurada el microcontrolador.
- Puerto GPIO: Puerto al cual está conectado el relé en el microcontrolador.

Esta información que se visualiza está previamente establecida en un archivo de configuración y es de este

archivo de donde se obtienen los datos para establecer las conexiones del programa con los dispositivos.

**Pestaña Usuarios.** En esta pestaña se visualiza:

- Buscar: En la parte de buscar se puede realizar por cédula o por nombre.
- Nuevo: Con este botón se realiza la creación de usuarios nuevos.
- Tabla Usuarios: Se visualizan los usuarios que existen registrados, permite eliminar usuarios y para editarlos se tiene que hacer doble *click* sobre el usuarios que se quiere editar.

**Pestaña historial.** En esta pestaña se visualiza:

- Fecha inicial: Permite definir la fecha y la hora desde la que se desea ver el histórico de ingreso.
- Fecha final: Permite definir la fecha y la hora hasta la que se desea ver el histórico de ingreso.
- Tabla de historial de ingresos: En esta tabla se observan los ingresos que se hayan registrado en el intervalo de tiempo que se haya filtrado anteriormente.

Para el microcontrolador se realizó un programa utilizando el lenguaje C#, en el cual se establecen parámetros de comunicación Ethernet como lo son IP, puerta de enlace y máscara, después de tener estos parámetros establecidos se configura el tiempo que pondrá un puerto digital en alto, el cual está conectado al relé que a su vez está conectado al electroimán.

En el programa se establece la comunicación cliente-servidor para que el microcontrolador se quede escuchando a la espera de que el sistema de respaldo le envíe el mensaje HTTP, el cual una vez recibido es analizado y comparado para validar que posee la estructura correcta y al mismo tiempo identificar cual puerto digital es el que debe habilitar. Una vez identificado, pone el puerto en alto deshabilitando el electroimán y después de esperar el tiempo configurado, pone el puerto en bajo nuevamente.

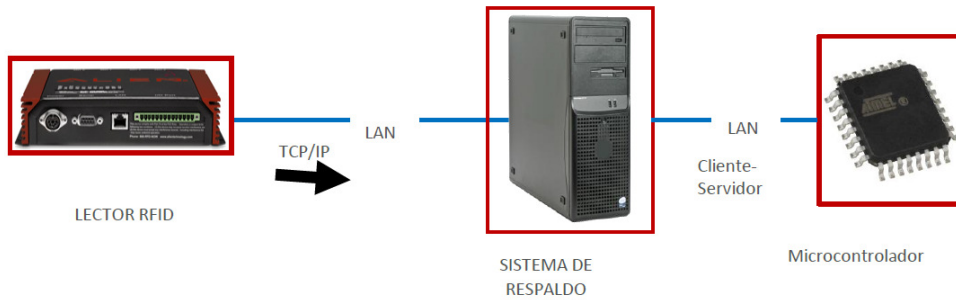


Figura 3. Diagrama de bloques de los protocolos de comunicación.

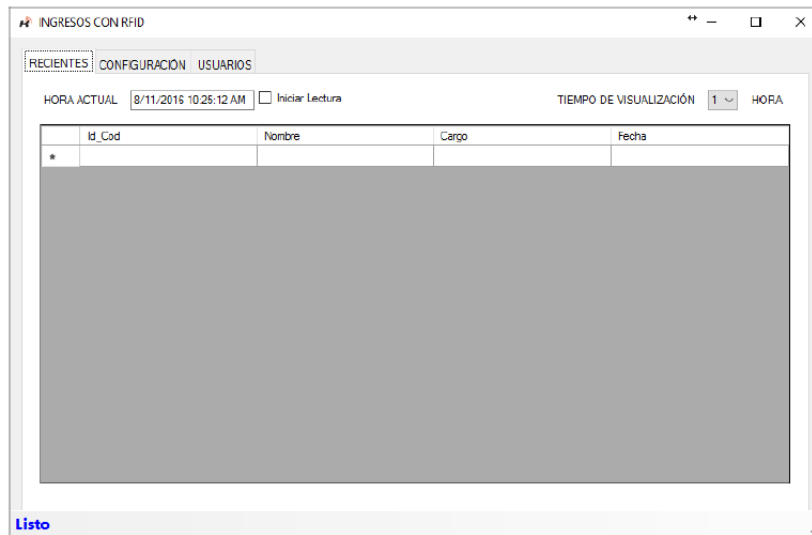


Figura 4. Interfaz Gráfica. Pestaña de Recientes.

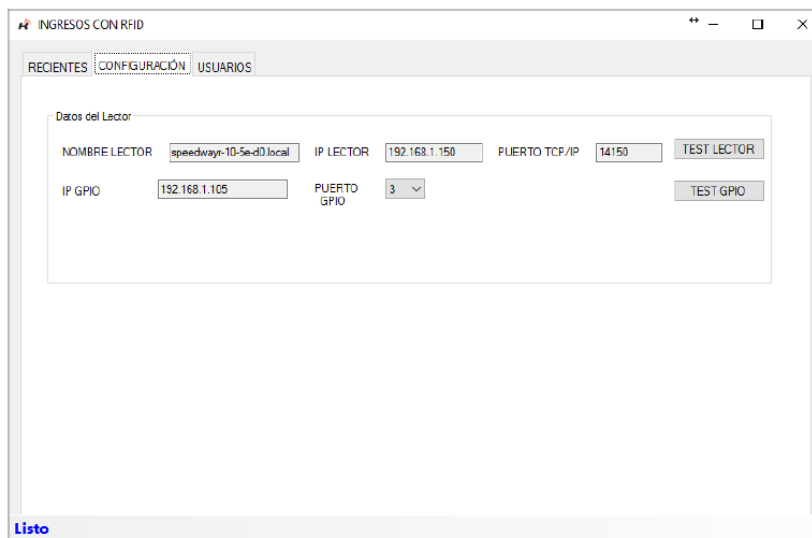


Figura 5. Interfaz Gráfica. Pestaña de Configuración.

### Análisis y resultados

Como se está trabajando con un *Middleware* que se encuentra instalado dentro del lector RFID UHF, este permite

configurar la potencia de la antena, la sensibilidad de lectura,



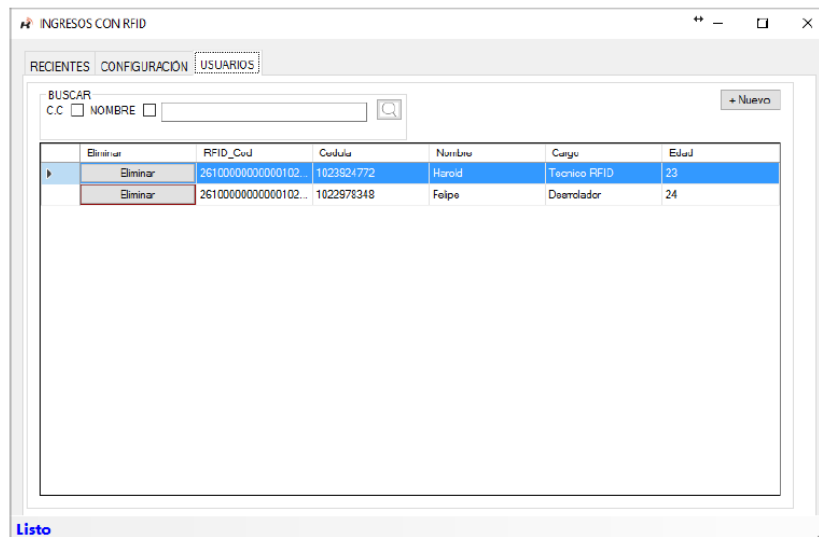


Figura 6. Interfaz Gráfica. Pestaña de Usuarios.

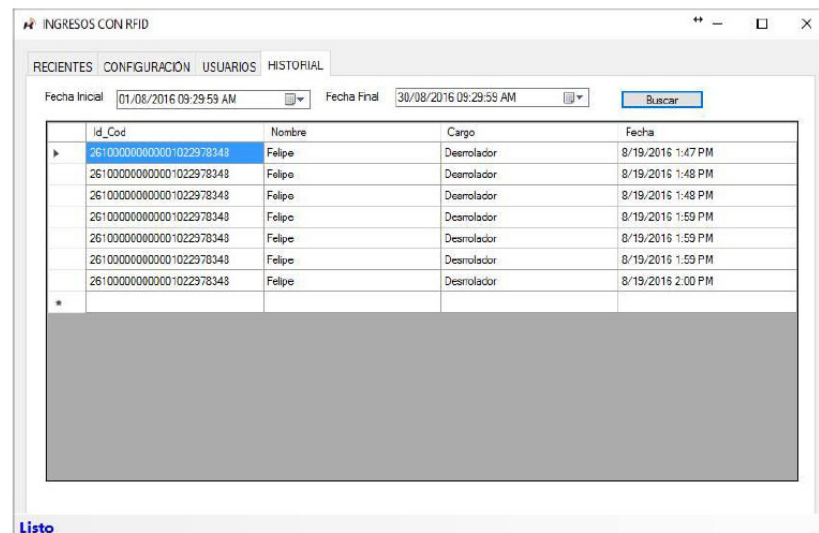


Figura 7. Interfaz Gráfica. Pestaña de Historial.

el tipo de lectura y el tiempo que el lector mantiene en memoria una lectura después de que deja de ver el *Tag*.

Para determinar cuál sería la configuración correcta se realizaron las configuraciones descritas en la tabla 2.

Una vez terminadas la pruebas se observó que la posible configuración que mejor se adaptaba a la solución era la numero 11, debido a que daba una distancia promedio fácil de controlar, además de que entregaba menos lecturas por segundo, lo que representa una ventaja ya que el programa se diseñó para que con una sola lectura efectiva se realizara el proceso de verificación y posterior autorización de ingreso.

De acuerdo a lo anterior se configuró el *Middleware* con la configuración mencionada, y luego se conectó el lector y el microcontrolador al programa donde se realizaron

las siguientes pruebas: Se utilizaron dos carnés, los cuales se acercaban y alejaban de la antena, esto con el fin de identificar la cantidad de lecturas y comportamiento del microcontrolador, lo cual arrojo los resultados mostrados en la tabla 3.

Esta prueba se realizó con el fin de identificar la cantidad de lecturas tomadas por la antena según los tiempos configurados. Como se pudo observar, durante el tiempo en que se dejara la tarjeta dentro del rango de lectura, la antena tomaría una serie de lecturas simultáneas, registrándolas todas y activando el electro-imán esta misma cantidad de veces.

Teniendo en cuenta los resultados y que el lector cuenta con un sistema de anti-colisión, fue posible ultimar la manera



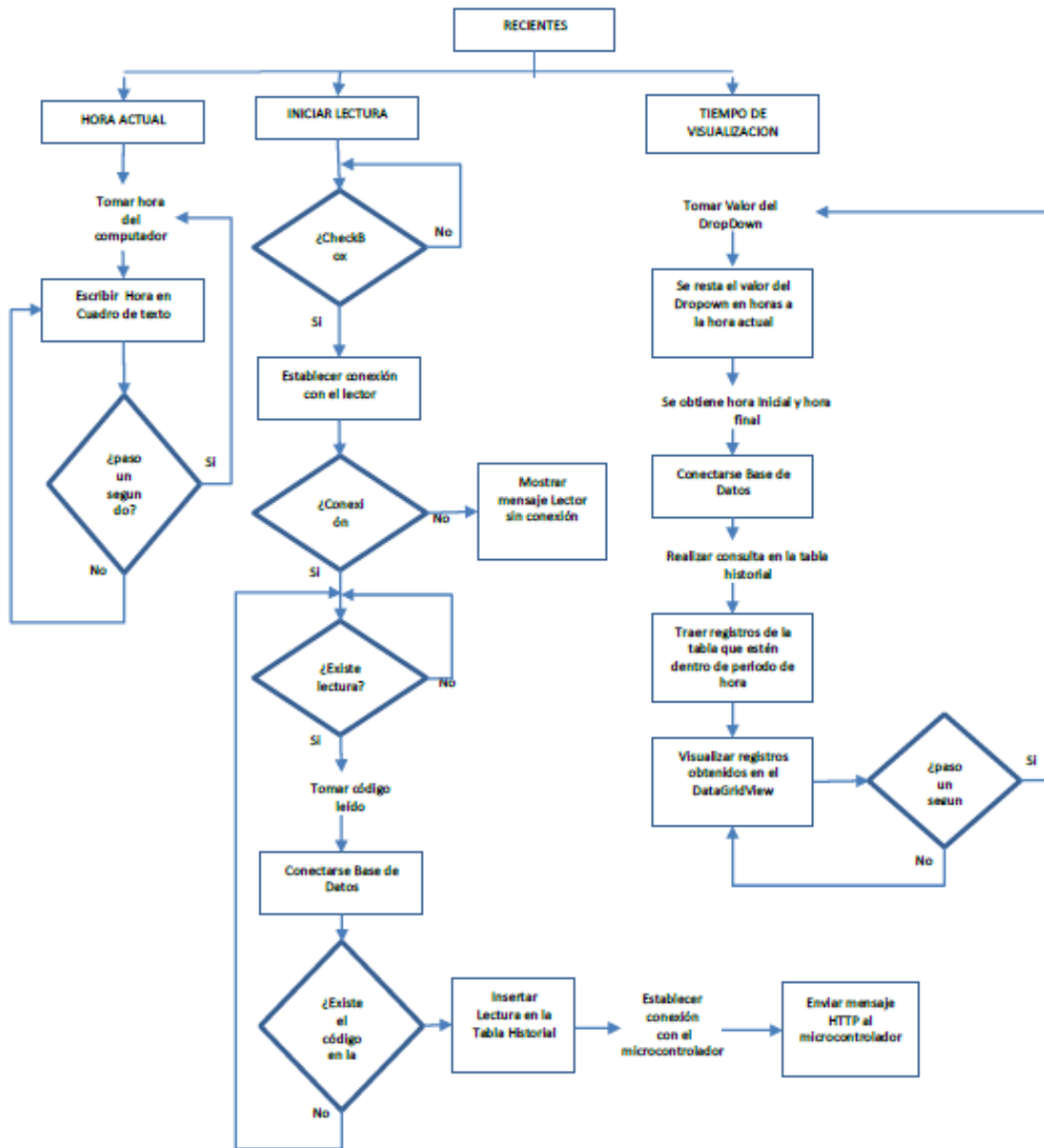


Figura 8. Esquema de funcionamiento pestaña recientes.

en la que se tendría que configurar los parámetros de lectura en el *Middleware* así como también se debía programar el módulo para contrarrestar este problema y evitar una posible colisión del sistema o múltiples aperturas del electro-ímán en una misma lectura. Así, se optó por configurarlo según los parámetros de la sesión 2, siendo el que menos lecturas arrojaba, logrando un único registro a pesar de que arrojará varias lecturas y por ende un único pulso de apertura.

### Conclusiones

Se pudo implementar un sistema en última instancia eficaz, seguro y rápido, eficiente para los empleados

de la oficina, un sistema completo para la función de acceso que estaba siendo requerido. Se observó que al utilizar la tecnología RFID UHF, la lectura de cada carné entregado a los funcionarios es efectiva y rápida, permitiendo un ingreso automático y sin retrasos. La comunicación Ethernet dió la facilidad de establecer el enrutamiento de datos eficiente y confiable sin estar limitados a tener los equipos uno cercano del otro. Teniendo en cuenta las características del protocolo TCP/IP, se pudo establecer una comunicación y una transmisión de los datos leídos de alta velocidad, sin ningún tipo de pérdidas. La plataforma de Visual Studio brindó un ambiente de desarrollo óptimo para el desarrollo de una aplicación familiar y amigable,

Tabla 2

Detalles de las configuraciones de prueba.

Configuración	Potencia Antena	Sensitividad Antena	Distancia obtenida de Lectura máxima	Cantidad de lecturas por segundo
1	27 dbm	-60 RSSI	2 m	7-10
2	27 dbm	-50 RSSI	1.7 m	7-10
3	25 dbm	-60 RSSI	1.5 m	7-10
4	25 dbm	-50 RSSI	1.2 m	7-10
5	27 dbm	-60 RSSI	2 m	3-5
6	27 dbm	-50 RSSI	1.7 m	3-5
7	25 dbm	-60 RSSI	1.5 m	3-5
8	25 dbm	-50 RSSI	1.2 m	3-5
9	27 dbm	-60 RSSI	2 m	1-2
10	27 dbm	-50 RSSI	1.7 m	1-2
11	25 dbm	-60 RSSI	1.5 m	1-2
12	25 dbm	-50 RSSI	1.2 m	1-2

Tabla 3

Resultados de pruebas sobre prototipo.

Código del tag	Tiempo de presencia	Sesión de lectura	Cantidad de lecturas	Numero de mensajes enviados al microcontrolador	Tiempo configurado duración Puerto en alto	Numero de mensajes HTTP procesados por el microcontrolador	Cantidad de Activaciones del electro imán
26100000000001023924772	5 seg	0	15	15	2 seg	15	15
26100000000001022978348	10 seg	0	30	30	2 seg	30	30
26100000000001023924772	15 seg	1	20	20	5 seg	20	20
26100000000001022978348	2 seg	1	9	9	5 seg	9	9
26100000000001023924772	20 seg	2	3	3	5 seg	3	3
26100000000001022978348	30 seg	2	5	5	5 seg	5	5

proporcionando todas las herramientas necesarias para la comunicación Ethernet. Todos los equipos implementados fueron equipos de bajo costo permitiendo de esta manera una inversión relativamente económica para un sistema de acceso completo. El lector R420 usado, junto con su respectiva antena permite usar el espectro de frecuencias de UHF con total factibilidad. La implementación del sistema genera ahorro del tiempo destinado a la gestión de las labores de la empresa, lo que representa una mayor productividad y en ultimas, mayores ingresos. Con este proyecto también la empresa logra un valor agregado en modernización de sus procesos, así como gana una valorización monetaria de la edificación.

### Referencias

Casar, J. (2005). *TSSI tecnologías y servicios para la sociedad de la información*. On line. (Universidad Politécnica de Madrid)

Huang, T. J., Hsu, H. T., y Jhang, H. J. (2012). A compact low-profile circularly-polarized antenna for ultra high frequency (uhf) radio frequency identification (rfid) reader applications. En *Ieee international conference on wireless information technology and systems (icwits 2012)* (p. 1-4).

Park, N., Lee, J., Kim, H., Chung, K., y Sohn, S. (2006). A layered approach to design of light-weight middleware systems for mobile rfid security (smrm : Secure mobile rfid middleware system). En *10th ieeefip network operations and management symposium (noms 2006)* (p. 1-4).

Shafin, M. K., Kabir, K. L., Hasan, N., Mouri, I. J., Islam, S. T., Ansari, L., y cols. (2015). Development of an rfid based access control system in the context of bangladesh. En *International conference on innovations in information, embedded and communication systems (iciiecs 2015)* (p. 1-5).

Want, R. (2006). An introduction to rfid technology. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1), 25-33.



# Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana

*Robotic hand prototype inspired by the human hand*

Andrés F. García G.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
afgarciag@correo.udistrital.edu.co

Andrés J. Becerra

Inmel S.A.S.  
ajbecerra@correo.udistrital.edu.co

---

Este artículo describe el diseño y construcción de un prototipo de mano robótica que replica algunas características funcionales presentes en la mano humana. Se determinó el diseño más favorable con base en el estudio propio y del análisis de documentos científicos basados en prototipos similares ya desarrollados en nuestro país y en el mundo. Se realizaron diferentes pruebas y simulaciones con el fin de determinar los materiales a usar y la forma de realizar el ensamble para su construcción. La mano robótica esta compuesta por cinco servomotores los cuales transmiten el movimiento a través de hilos de nailon a cada uno de los dedos, haciendo la función de tendones y músculos de la mano humana real. El prototipo cuenta con un servomotor adicional el cual permite el realizar la extensión y flexión de la mano. Los servomotores se encuentran ubicados en un antebrazo diseñado de forma que se asemeja al antebrazo humano, con el fin de que la forma del conjunto de la mano y el antebrazo se asemejen a la morfología humana.

*Palabras clave:* Mano, modelado, prototipado, robot

This paper describes the design and construction of a prototype of robotic hand that replicates some functional features present in the human hand. The most favorable design was determined based on the own study and the analysis of scientific documents based on similar prototypes already developed in our country and in the world. Different tests and simulations were carried out in order to determine the materials to be used and the way of assembly. The robotic hand is composed of five servomotors which transmit the movement through nylon threads to each of the fingers, making the tendons and muscles function of the real human hand. The prototype has an additional servomotor which allows the extension and flexion of the hand. The servomotors are located in the forearm, so the design resembles the human forearm, the shape of the whole hand and forearm resemble the human morphology.

*Keywords:* Hand, modeling, prototyping, robot

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Noviembre 4, 2016

**Fecha aceptación del manuscrito:** Diciembre 5, 2016

**Investigación financiada por:** Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

**Cómo citar:** García, A., y Becerra, A. (2016). *Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana*. Revista Tekhnê, 13(2), 27-42.

## Introducción

El mundo actual tiene una gran revolución tecnológica con grandes avances científicos, entre estos están los robots, herramientas útiles en la cotidianidad. Estas herramientas ayudan al ser humano con trabajos en fábricas y en hogares. Cada día los empresarios y personas tienen la necesidad de adquirir estos robots para mejorar procesos o hacer la vida un poco más fácil. Teniendo en cuenta estas necesidades, se construyen robots que sustituyan o releven al ser humano total o parcialmente en labores donde hallan ambientes hostiles, contaminados, de alto riesgo de accidentalidad o falta de habilidades que el ser humano no pueda realizar. El prototipo de mano robótica es en sí una plataforma robótica que puede ser de gran ayuda para suplir estas necesidades laborales, así como para reemplazar los movimientos de la mano humana.

El desarrollo de manos robóticas es una de las áreas más estudiadas a nivel mundial, debido a que la mano humana cumple con funciones mecánicas, sensitivas y hasta de comunicación, además es nuestro principal órgano para la manipulación física del entorno (Zuñiga y Andrade, 2011), debido a esto se han desarrollado en el mundo y en nuestro país gran cantidad de prototipos y estudios.

De los prototipos estudiados se considerada de relevancia la mano desarrollada por R. Mahmoud (Mahmoud, Ueno, y Tatsumi, 2011). Este trabajo presenta un robot antropomorfo llamado mano Osaka-Ciudad-Universidad-Mano II. Ellos diseñaron una mano robótica estética que permite su uso como una prótesis de mano. Utilizaron sensores táctiles distribuidos en el prototipo OCU-Mano II con el fin de tomar objetos con firmeza. Una estrategia es que por medio de un guante maestro puedan conducir el prototipo OCU-mano II como un esclavo con el fin de aumentar la resolución de la técnica de conducción maestro-esclavo. El prototipo OCU-Mano II se utiliza como equipo auxiliar que ayuda a los operadores, reduciendo sus cargas en tareas cotidianas de una manera mejor y más rápida.

En cuanto a diseño morfológico de la mano, es de importancia la investigación documentada en *An Anthropomorphic Design Guide line for the Thumb of the Dexterous Hand* (Hairong, Shaowei, y Hong, 2012), donde se analizan las capacidades de manipulación más relevantes que tiene la mano humana, como es el movimiento del dedo pulgar, como antesala para el diseño del robot. En este documento se muestra una guía de diseño antropomórfica para el dedo pulgar de la mano. Con el modelo de articulación del pulgar, se abstraen cinco configuraciones de pulgar que sirven para el diseño de una mano robótica diestra. De acuerdo con el teorema de Euler sobre finito de rotación de cuerpo rígido, se propone un nuevo método para determinar la posición del pulgar en la palma de la mano. Además, se evaluó la destreza de la mano en la manipulación



Figura 1. Mano Osaka-Ciudad-Universidad-Mano II (Mahmoud et al., 2011).

de un objeto, con un método numérico para calcular la oponibilidad del pulgar basado en el método de Monte Carlo.



Figura 2. "The HIT/DLR II hand" (Hairong et al., 2012).

En cuanto a modelamiento, morfología y control es el artículo *Kinematic Modelling of Anthropomorphic Robot Upper Limb with Human like Hands* (Tondu, 2009), toma especial importancia el diseño y la apariencia. Los diseñadores de robots toman interés en la apariencia de la mano humana, y desarrollan modelos cinemáticos para las manos artificiales robóticas.

En cuanto al mecanismo utilizado para realizar el movimiento de los dedos de la mano robótica el artículo *Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas* (Zuñiga y Andrade, 2011) (Fig. 4) nos muestra un prototipo desarrollado con un mecanismo fácil de replicar, el cual cuenta con servomotores e hilo de nailon

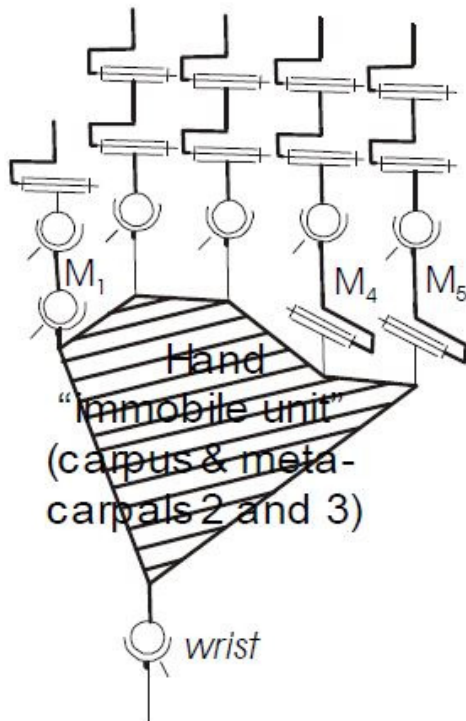


Figura 3. Modelado cinemático de la mano - Integración del carpo y los metacarpianos 2 y 3 en la Mano (Tondy, 2009).

para realizar el respectivo movimiento de cada uno de los dedos, el artículo describe como se realizó un programa de interfase donde por medio de una cámara y un programa de adquisición de imágenes se tomaron los patrones del alfabeto dactilológico para personas sordomudas para que luego el prototipo las ejecute.

Buscando realizar una mano robótica antropométricamente más próxima a la mano humana, el prototipo descrito en el artículo *Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada* (Pérez, 2012) (Fig. 5) fue realizado a partir del análisis y procesamiento de imágenes tomográficas computarizadas generando un modelo en tres dimensiones de la mano humana; con base en esto construyen un modelo en CAD, donde logran obtener las dimensiones y forma de cada uno de los componentes del prototipo, realizando una mano robótica en aspecto muy similar a la mano humana.

Con base en la investigación desarrollada se realiza un prototipo, para dotar al grupo de investigación de un modelo de partida que recrea algunas de las funciones de la mano humana. El proyecto se basó en la construcción de un prototipo de mano robótica, Se encontró y se tuvo en cuenta para la construcción, utilizar materiales livianos, resistentes, de gran calidad y de bajo costo que se encontraran en el

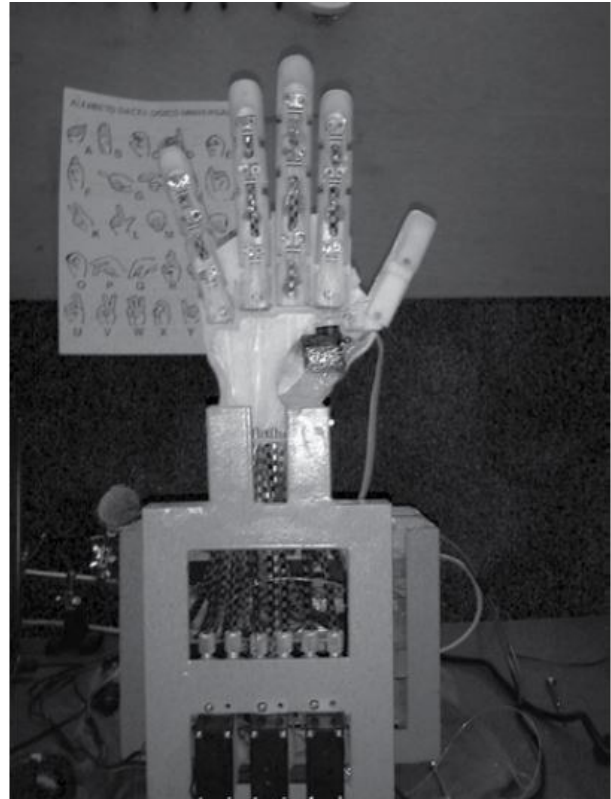


Figura 4. Mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal (Zuñiga y Andrade, 2011).

mercado. Todas estas características adaptadas optimizaron las cualidades y capacidades del arquetipo. Uno de los criterios de diseño fue la construcción del prototipo con medidas estándares similares a las de la mano humana. Estas dimensiones adaptadas al prototipo sirvieron para mostrar una parte estética, emular cualidades y capacidades, además de la conexión futura con los otros prototipos. La construcción contiene dispositivos y estructuras que ayudaron a imitar movimientos de articulación buscando alcanzar y posiblemente en un futuro mejorar las capacidades de funcionamiento de la mano humana.

La organización del artículo está conformada de la siguiente manera: en la sección 2, se presentan conceptos de funcionalidad y diseño del modelo de mano robótica. En la sección 3, se describe el diseño estructural del prototipo de mano robótica, incluyendo los criterios y especificaciones aplicados en la construcción. En la sección 4 se muestra la evaluación de funcionamiento y desempeño del prototipo mediante el modelo real, que realiza los movimientos y acciones, para la cuales fue creado. Finalmente la sección 5 concluye el artículo.



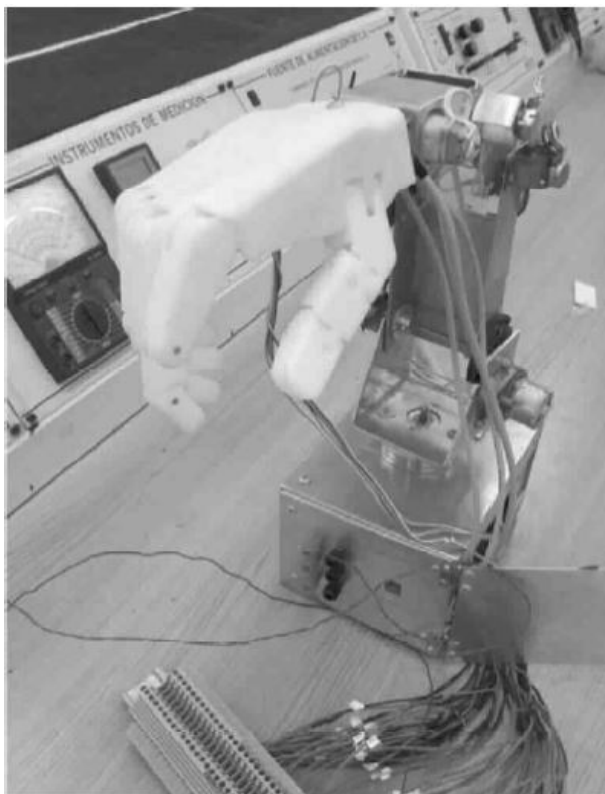


Figura 5. Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada de la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012).

### Formulación del problema

Los criterios que se definieron para desarrollar y determinar la mejor forma de realizar el prototipo se basaron en un análisis de necesidades, disponibilidad y costos de los aspectos más importantes encontrados en diversas investigaciones realizadas (Dang, Weisz, y Allen, 2011; Hairong et al., 2012; Hyunhwan y Joono, 2011; Mahmoud et al., 2011; Pérez, 2012; Tondu, 2009; Zuñiga y Andrade, 2011). Este análisis permitió proponer cinco criterios los cuales son: Movimiento de la estructura mecánica, Programación y selección del módulo de control, articulación y Materiales. Con la unión de esto se pudo obtener los mejores resultados; los criterios serán descritos a continuación.

### Movimiento

Los requerimientos necesarios para llevar a cabo el movimiento del prototipo fueron apoyados por diversos ejemplos e investigaciones. El principal fue los movimientos naturales de la mano humana y modelos similares realizados en el mundo. Para llevar a cabo estas articulaciones en el prototipo; fue necesario el uso de un conjunto de mecanismos que crean la contracción, estiramiento y giro del arquetipo

estos movimientos son los grados de Libertad. El número de DOF (degrees of freedom) de un robot suele coincidir con el número de articulaciones que posee (Hyunhwan y Joono, 2011)(Tondu, 2009). Como ejemplo de esto está la Fig. 6 que muestra el modelo cinemático de un prototipo de mano con 13 DOF, la Fig. 7 corresponde al prototipo real.

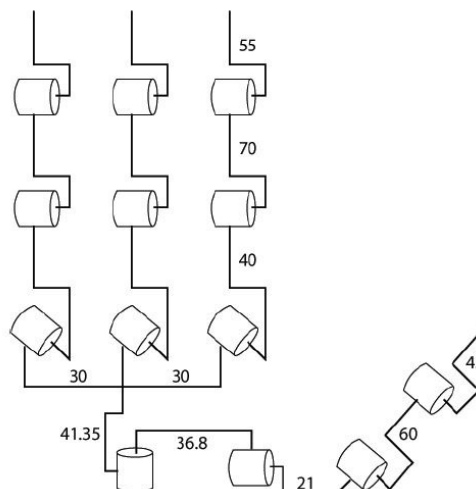


Figura 6. Modelo cinemático de la "KU hybrid HAND"(Hyunhwan y Joono, 2011).

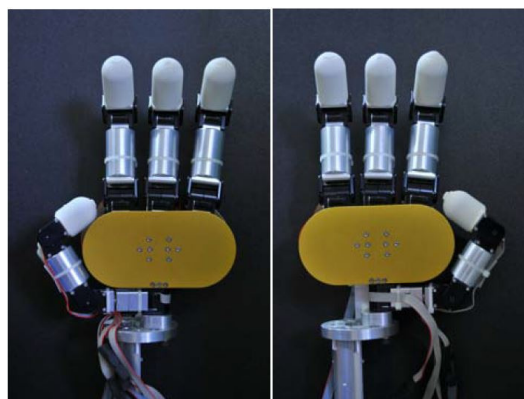


Figura 7. Prototipo real de la "KU hybrid HAND"(Hyunhwan y Joono, 2011).

Con fin de hacer un prototipo más próximo a la mano real se incluirá el cuarto dedo al proyecto, esto para mejorar su apariencia y funcionalidad. Aumentando a 16 DOF, esto será detallado en la sección 3.

### Programación y módulo de control

Buscando una plataforma de fácil manejo y bajo costo se optó por trabajar con Arduino que es un hardware libre, está compuesto por una placa con un microcontrolador y cuenta

con puertos de entrada/Salida. El software utiliza un lenguaje de programación llamado Processing/Wiring muy similar al C ANSI (Monk, 2011), con base en esto se selecciona el Arduino nano como módulo de control debido a su tamaño, costo, capacidad, facilidad de programación y montaje en el prototipo final.

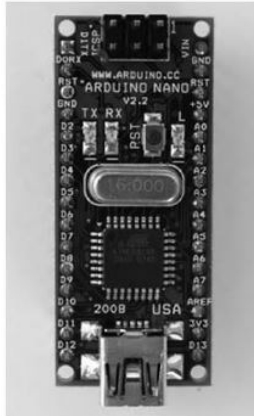


Figura 8. Arduino Nano (Monk, 2011).

### Articulación

La función de la mano robótica es la articulación, es ahí donde se tiene el punto de acción principal de esta. Para llevar a cabo esta función se necesitó de un prototipo mecánico que tuviera componentes electrónicos (actuadores) adecuados, además de una correcta morfología y tamaño. Con todas estas características reunidas se permitió generar y ver la articulación real del arquetipo.

De acuerdo a la idea definida en el diseño, se pretendió que la mano robótica tuviera formas reales y dimensiones similares a la mano humana, ya que estas características permiten una buena flexión y deflexión de las coyunturas del prototipo, asimismo un conjunto de articulaciones para emular diferentes tipos de agarres. Estas cualidades adaptadas al arquetipo, dan la ventaja de relacionar y poder comparar la eficiencia en los movimientos con respecto a la mano del ser humano.

### Materiales

En la fabricación del prototipo de mano robótica, se utilizó una impresora 3D propiedad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuyo material de impresión puede ser el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) como el PLA (poly lactic acid) que por medio de la extrusión de delgadas capas de alguno de estos materiales, se va creando un modelo sólido en tres dimensiones. Estos materiales ofrecen diferentes tipos de características, como que el ABS requiere una mayor temperatura y ofrece una pieza con un mejor

acabado siendo más flexible, mientras que el PLA es más frágil pero más fácil de modificar de ser necesario (Molina, 2016), ambos comparten un bajo costo y ambos cuentan con cualidades que fueron aprovechadas para el correcto ensamble y funcionamiento del prototipo.

### Metodología

La metodología de este proyecto fue trazada de forma congruente y ordenada que deriva en cinco fases principales, las cuales se encuentran descritas en el siguiente orden: investigación, diseño, evaluación, construcción y documentación. Este conjunto sirvió para el desarrollo de un prototipo de mano robótica funcional.

Como se ha mostrado a lo largo del artículo este prototipo se apoyó en el estudio de diferentes propuestas ya ejecutadas en el mundo, las cuales se irán describiendo en el diseño de cada una de las partes que componen el prototipo y como determinaron parámetros del mismo.

### Diseño

En principio para la construcción de la mano robótica, se utilizó un software CAD (diseño asistido por computadora) llamado Solid Works, en este inicialmente se generan las piezas del prototipo y posteriormente se realizaron las diferentes pruebas, modificaciones y ensamblaje final con cada una de las piezas. El diseño del prototipo se distribuyó entre de los dedos, la palma y el antebrazo descritos a continuación.

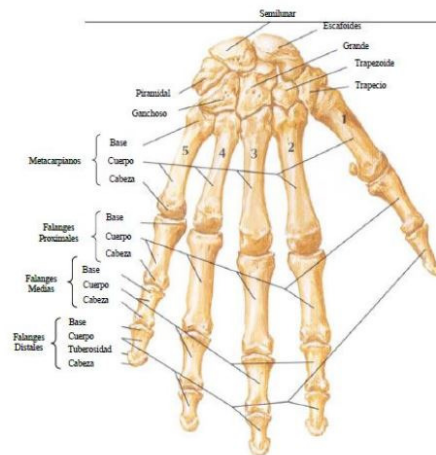


Figura 9. Huesos de la mano (mano derecha, vista dorsal) (Netter, 2011).

La Fig. 9 será usada como referencia inicial debido a que es la mano humana la que se busca asemejar con el prototipo.

**Diseño de los dedos.** Los dedos están compuestos por las falanges que son distal, media y proximal, son en total catorce huesos, dos en el pulgar (el pulgar no tiene falange media) y tres en cada uno de los otros cuatro dedos (Netter, 2011) como se observa en la Fig. 9, para generar los dedos partimos de la tomografía y el estudio realizado de la mano derecha de un varón de 25 años de edad 1.73 m de altura y 81 kg de peso realizado por la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012), con base en esto se generan piezas en Solid Works redondeadas con el fin de obtener un dedo más similar al humano.

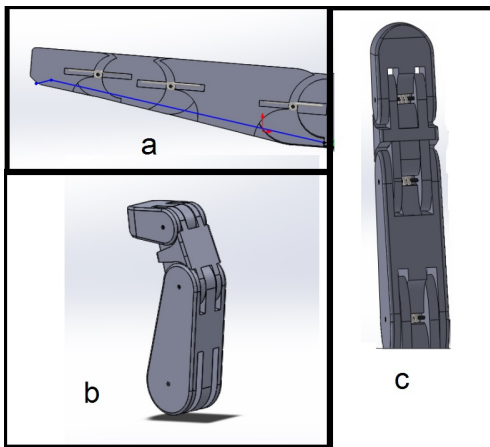


Figura 10. a) dedo corte interno, b) dedo vista frontal, c) dedo vista posterior.

Como se observa en la Fig. 10 (apartado a) el dedo se encuentra conectado por cada una de las falanges a través de eslabones y por medio de resortes estos cumplirán con tener los dedos estirados, esta sería la posición natural de los dedos.

El diseño del dedo pulgar al no contar con una falange media (Netter, 2011); consta de la falange distal, proximal y el metacarpiano el cual permitirá que el pulgar haga el movimiento de abducción y flexión hacia el centro de la palma de la mano, movimiento natural en la mano humana (Cailliet, 2006).

**Diseño de la palma.** La palma se diseñó con el fin de ser el punto de conexión de cada uno de los dedos, como resultado al ser dirigidos cada uno de los dedos hacia la palma será lo que le permita al prototipo sostener objetos (Hairong et al., 2012), al igual que en la pieza anterior esta es basada en la tomografía y en el trabajo realizado en la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012) adaptada al mecanismo de movimiento seleccionado.

Como se observa en la Fig. 12 la pieza intenta reproducir los arcos y la forma de las curvas naturales de una mano humana (Pérez, 2012). Se destaca algo que se observó en los trabajos investigados (Mahmoud et al., 2011) (Pérez, 2012) es que la altura a la que se encuentran conectados los dedos

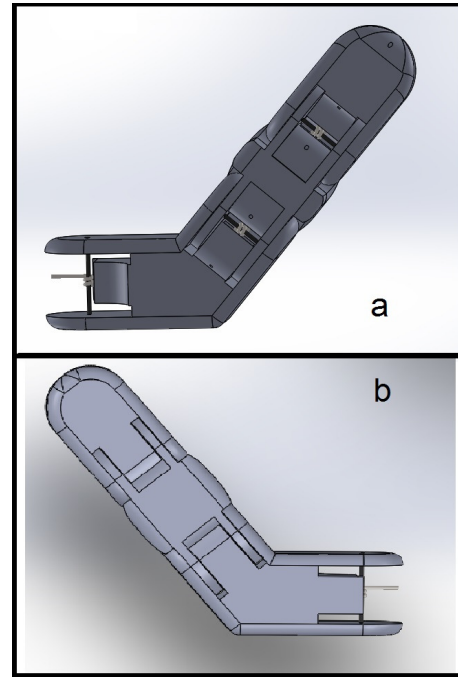


Figura 11. a) Pulgar vista frontal, b) Pulgar vista posterior.

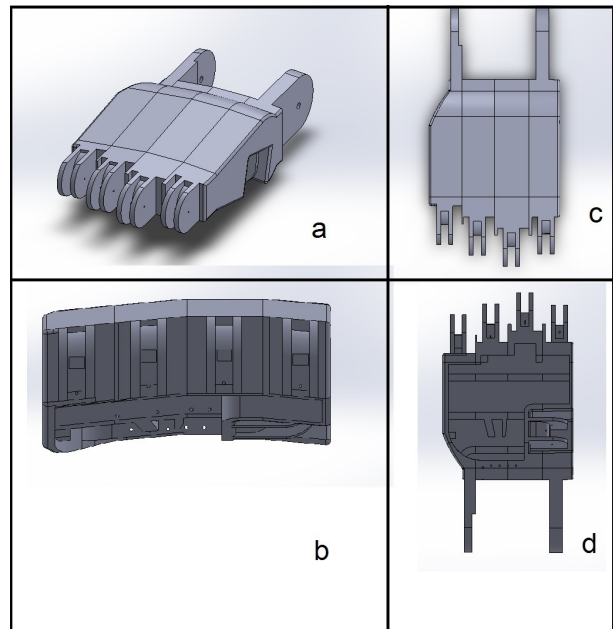


Figura 12. a) Palma, b) Palma frontal, c) Palma vista inferior, d) Palma vista superior.

no es la misma para cada uno de ellos esto se debe a que en la mano humana figura mano los metacarpianos no miden lo mismo para cada uno de los dedos (Netter, 2011). Otra cosa que cabe destacar es que la pieza es hueca esto es porque los dedos son movidos por hilos de nailon uno por cada



dedo, estos hilos necesariamente pasan por la palma como se muestra en la Fig. 13, estos hilos pasan por caminos que fueron diseñados buscando que el movimiento fuera el más óptimo sin presentar demasiada fricción que dificultara el movimiento de los dedos y en caso de que estos caminos fueran errados se lograra modificar la pieza una vez impresa sin necesidad de realizar una nueva impresión, adicional a esto restó peso en la palma facilitando el movimiento a la muñeca.

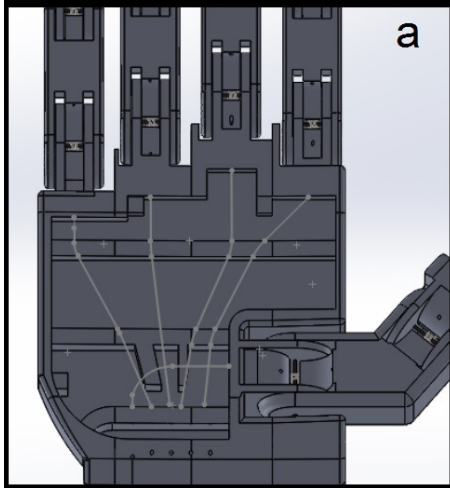


Figura 13. Caminos para el nailon de cada uno de los dedos.

Fue necesario diseñar junto a la palma una tapa debido a que la pieza es hueca esto se realizó con el fin de colocar un punto de apoyo para los objetos y hacerla estéticamente más similar a la mano humana (Pérez, 2012).

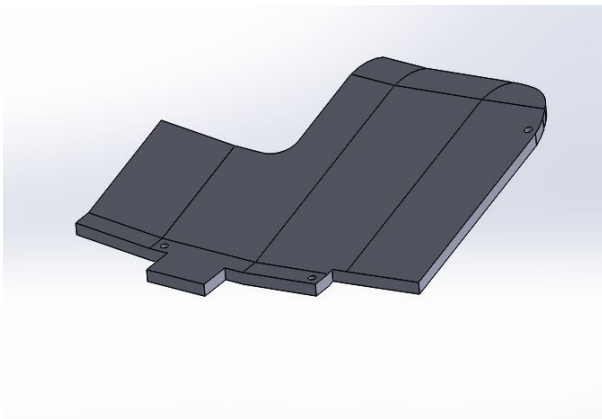


Figura 14. Tapa de la palma.

**Diseño del antebrazo.** El diseño del antebrazo se da debido al mecanismo que se seleccionó como el más práctico para el movimiento de los dedos, que es el de servomotores transmitiendo su movimiento a través de hilo nailon de cada uno de los dedos ocasionando la flexión de cada uno de estos

(Zuñiga y Andrade, 2011), con base en esto se pensó en un espacio donde se lograran albergar los servomotores y fuera similar al antebrazo humano, también se aprovechó para agregar un DOF adicional al conectar la mano al antebrazo por medio de otro servomotor.

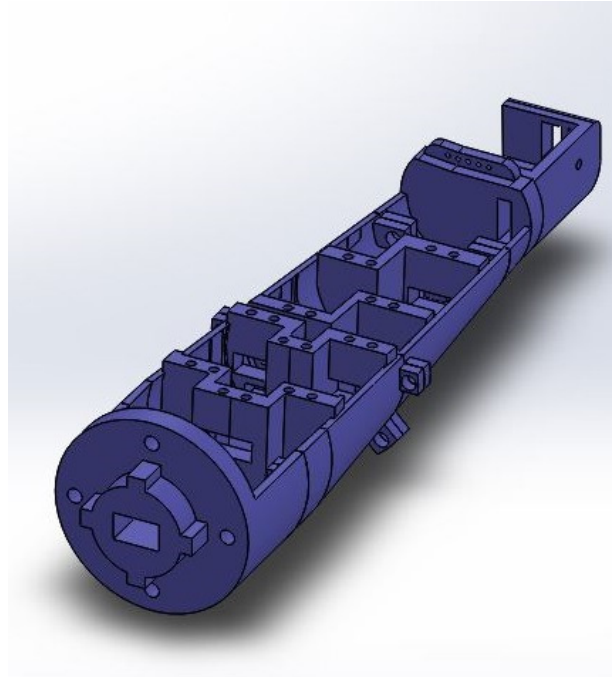


Figura 15. Pieza antebrazo.

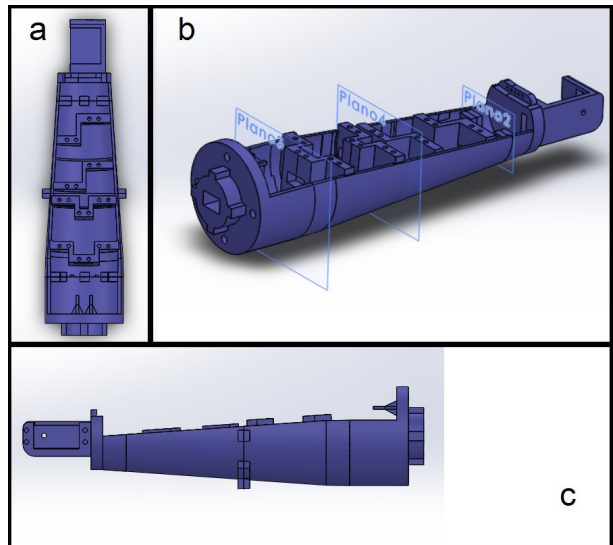


Figura 16. a) Antebrazo vista frontal diseño final, b) Antebrazo sin seccionar, c) Antebrazo vista lateral diseño final.

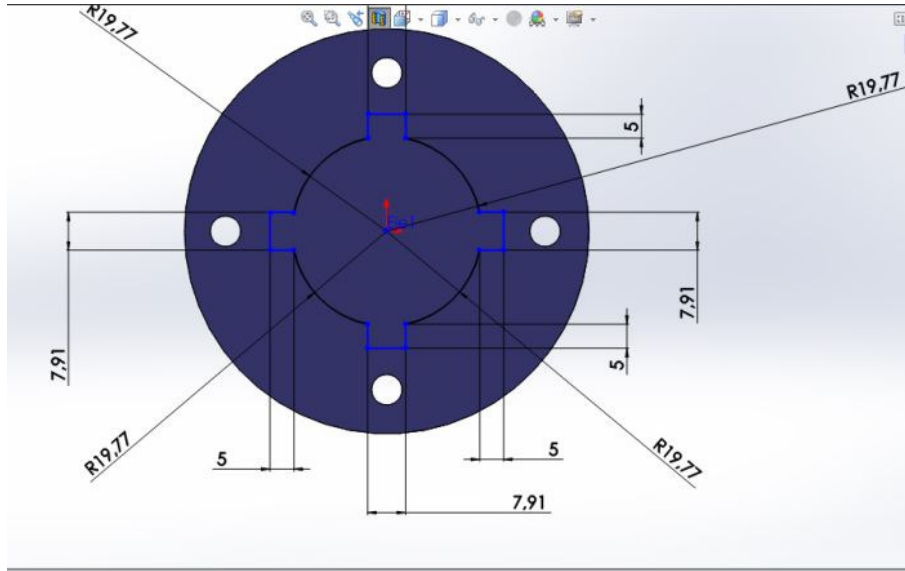


Figura 17. Dimensiones pieza de acople vista inferior del antebrazo.

La pieza se diseñó de forma que con una medida similar al de un antebrazo humano, se lograran ubicar los seis servomotores y ninguno de estos fuera interrumpir el movimiento del otro, para esto se tuvo en cuenta la distancia entre cada uno de estos, adicional como se observa en la Fig. 16 (apartado c) están ubicados de tal forma que los servos de la parte final quedan más altos que los del principio esto con el fin de que los hilos de nailon no se encuentren, en la parte final del antebrazo como se ve en la Fig. 16 (apartado a) se dejó un espacio destinado para la ubicación del módulo control; también como se ve en la Fig. 15 se creó un modo de conexión para implementarse con otros prototipos en futuros proyectos, en la Fig. 17 se observan las dimensiones de este acople.

### Evaluación de desempeño

Con el diseño de cada una de las piezas se procede a realizar pruebas y simulaciones en Solid Works para determinar diferentes aspectos sobre el prototipo antes de realizar la impresión de las piezas. En principio se realiza el ensamble de las piezas diseñadas como se muestra en la Fig. 18 para tener una idea de cómo se verá el prototipo, en esta figura también cabe destacar que únicamente se encuentran las piezas diseñadas que posteriormente serán impresas.

De la Fig. 18 se observa lo expresado en la tabla 1 y la tabla 2, donde se muestra la cantidad de grados de libertad DOF y las dimensiones del diseño.

Con el montaje de las piezas como se ve en la Fig. 19, con ayuda de Solid Works se determina el volumen, área de superficie, centro de masa, y el peso del Conjunto total,

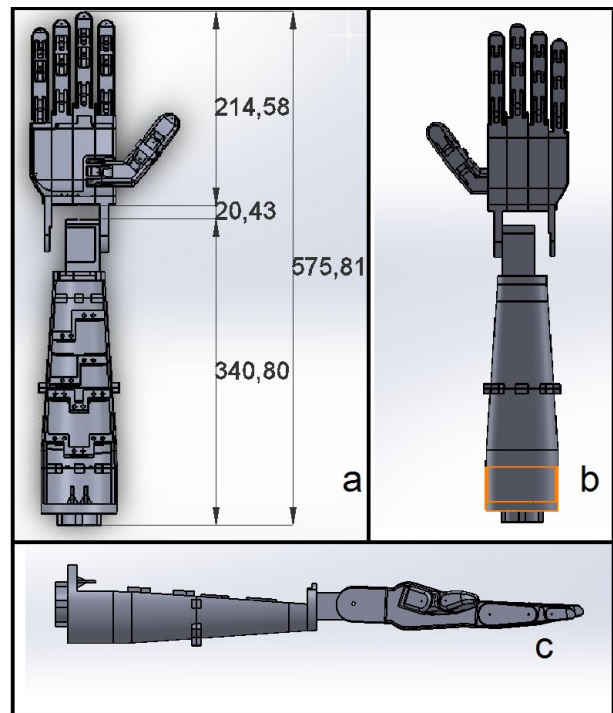


Figura 18. a) Vista frontal del ensamble y medidas en milímetros, b) Vista posterior, c) Vista lateral.

también como se observa en la Fig. 20 podemos ver la proporción de cada uno de los elementos que componen el diseño, junto a los valores individuales de cada una de las piezas para estos ejemplos se tomó el ABS como material.

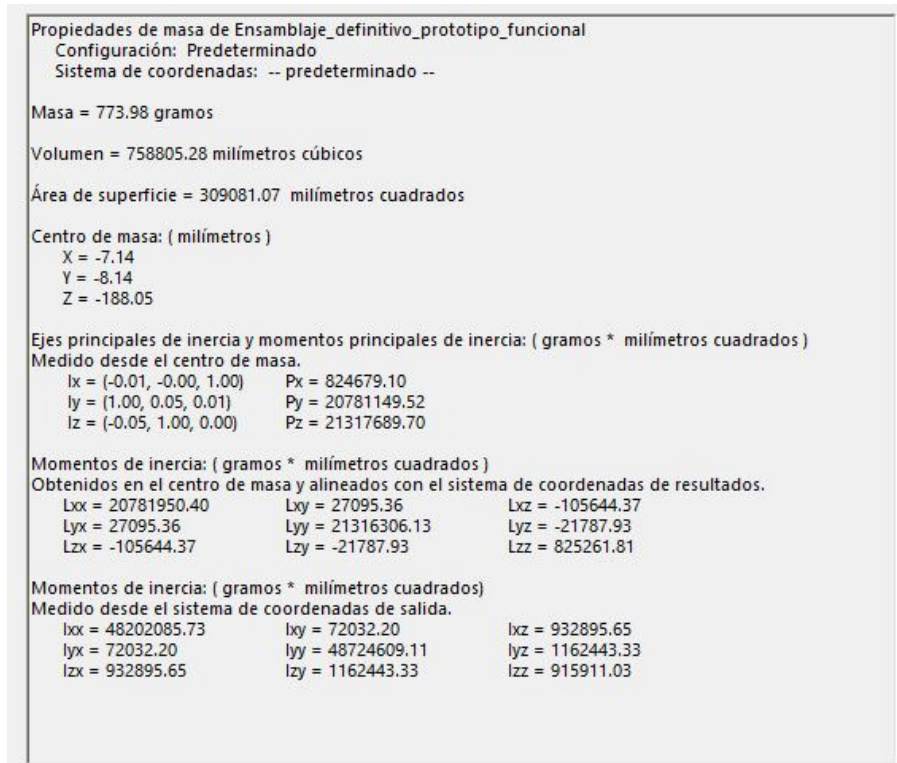


Figura 19. Propiedades de masa del ensamblaje

Tabla 1  
 Grados de libertad del prototipo.

CONJUNTO	GRADOS DE LIBERTAD (DOF)
Dedo indice	3
Dedo medio	3
Dedo anular	3
Dedo meñique	3
Dedo pulgar	3
muñeca	1
TOTAL	18

En la tabla 3 se puede observar el peso de cada uno de los elementos tanto para el ABS como para el PLA.

La prueba de mayor importancia que se realizó con el ensamble en Solid Works fue el determinar el Angulo de rotación máximo para los dedos como se observa en las Figs. 21 y 22, y la muñeca como se observa en la Fig. 23. Estos se realizaron manipulando el ensamble a los puntos límites y verificando con la herramienta detección de interferencias que no hubiera contacto entre las piezas, la importancia de la prueba se da debido a que determina

Tabla 2  
 Dimensiones del prototipo.

DIMENSION	MEDIDA [mm]
Alto	575.81
Ancho	166.32
Profundo	84.35

los ángulos máximos a los que por diseño puede alcanzar el prototipo.

Adicional se realizan pruebas complementarias con el asistente para análisis Simulation Xpress de Solid Works sobre cada una de las piezas, con este asistente se puede predecir el comportamiento de la pieza bajo cargas, como se observa en la Fig. 24 que es la simulación sobre una de las falanges. Debido al tamaño de las piezas se observa que estas no presentan un gran estrés mecánico o muestran una gran deformación por esto no es necesario el re diseñarlas.

Una vez realizadas las diferentes pruebas en Solid Works se define en que material serán impresas las piezas; teniendo la disponibilidad tanto del ABS como del PLA se determina que los dedos serán impresos en ABS mientras que las demás piezas serán impresas en PLA, se decide realizar de esta manera ya que el ABS es más flexible y ofrece una pieza

Visualización de ensamblajes					
Nombre de archivo	Cantidad	Área de superficie	Volumen	Peso total	
Pieza1_Palma_final	1	70876.08	277719.16	283.27	
Sólido2	1	53244.02	102215.58	104.26	
Sólido3	1	39214.02	69170.24	70.55	
Sólido1	1	34125.56	92557.97	94.41	
Sólido4	1	22672.31	55519.85	56.63	
Pieza1_Tapa_Palma	1	11824.17	15625.33	15.94	
Pieza1_Metacarpiano(Pulgar)test	1	9040.48	21841.37	22.28	
Pieza1_Falange Proximal(Indice.medio,anular,meñiq...	4	7973.65	14416.70	58.82	
Pieza1_Falange Proximal (Pulgar)test	1	6058.18	13093.60	13.36	
Pieza1_Falange distal(Pulgar)test	1	4413.12	10461.91	10.67	
Pieza1_Falange Media(Indice.medio,anular,meñique...	4	3746.28	6001.03	24.48	
Pieza1_Falange distal(Indice.medio,anular)	3	2695.36	4838.46	14.81	
Pieza1_Falange distal(Meñique)test	1	2647.32	4414.00	4.50	

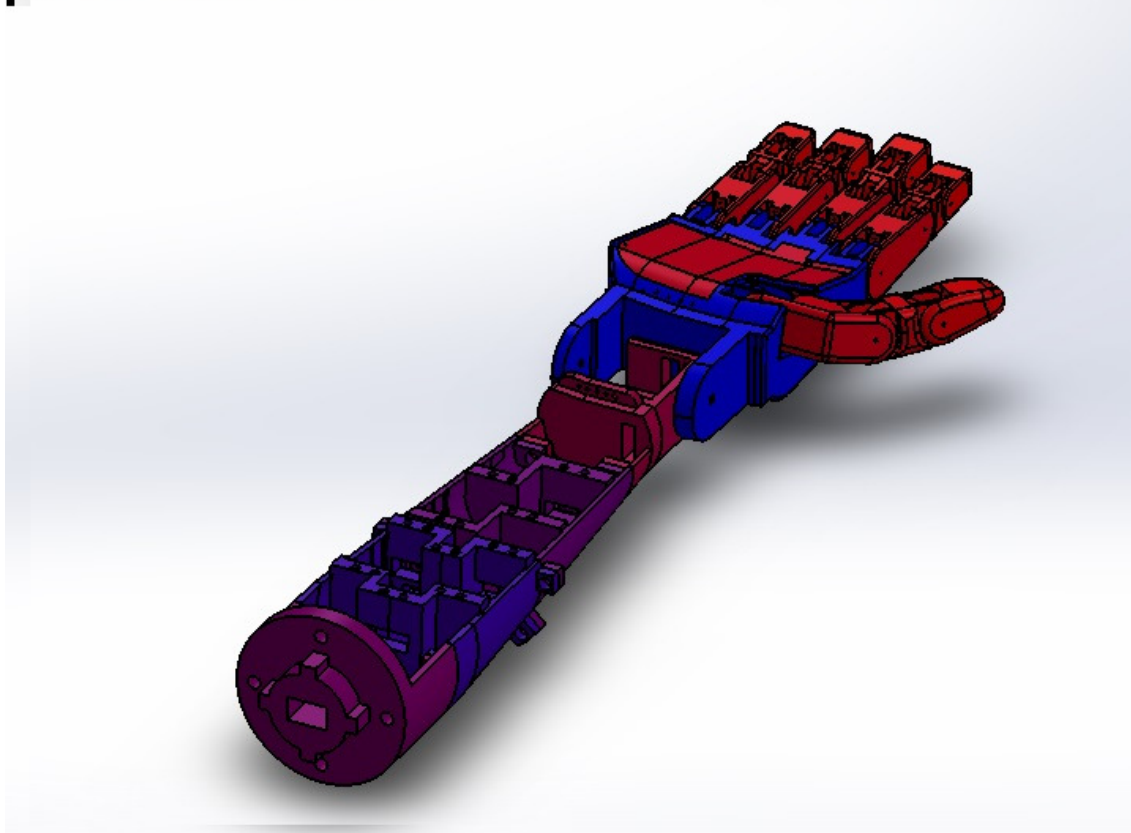


Figura 20. Proporción de volumen de cada pieza para el ensamblaje.

Tabla 3  
*Peso de las piezas en ABS y PLA.*

PIEZA	Cantidad	Área [mm2]
Palma mano	1	70876,08
Antebrazo Sólido2	1	53244,02
Antebrazo Sólido3	1	39214,02
Antebrazo Sólido1	1	34125,56
Antebrazo Sólido4	1	22672,31
Tapa Palma	1	11824,17
Metacarpiano(Pulgar)	1	9040,48
Falange Proximal	4	7973,65
Falange Proximal (Pulgar)	1	6058,18
Falange distal(Pulgar)	1	4413,12
Falange Media	4	3746,28
Falange distal(Índice.medio,anular)	3	2695,36
Falange distal(Meñique)	1	2647,32
TOTAL	21	268530,55

Tabla 4  
*Peso de las piezas en ABS y PLA (parte 2).*

PIEZA	Peso ABS[g]	Peso PLA [g]
Palma mano	283,27	336,04
Antebrazo Sólido2	104,26	123,68
Antebrazo Sólido3	70,55	83,7
Antebrazo Sólido1	94,41	112
Antebrazo Sólido4	56,63	67,18
Tapa Palma	15,94	18,91
Metacarpiano(Pulgar)	22,28	26,43
Falange Proximal	58,82	69,78
Falange Proximal (Pulgar)	13,36	15,84
Falange distal(Pulgar)	10,67	12,66
Falange Media	24,48	29,04
Falange distal	14,81	17,56
Falange distal(Meñique)	4,5	5,34
TOTAL	773,98	918,16

con un mejor acabado y al ser los dedos más pequeños se opta por esto; las piezas grandes se opta por el PLA ya que es un material un poco más frágil que permite realizar modificaciones de una manera más fácil (Molina, 2016). El peso final para las piezas es el mostrado en la tabla 5.

Para realizar la impresión de las piezas fue necesario realizar una modificación sobre la pieza del antebrazo la pieza original como se observa en la Fig. 16 apartado b era una pieza única pero debido al tamaño que puede imprimir la maquina no era posible realizar esta impresión, se tuvo

que seccionar el antebrazo en 4 piezas como se muestra en la Fig. 15 que una vez impresas serán conectadas a través de tornillos y tuercas como se muestra en la Fig. 27; para imprimir es necesario pasar las piezas al formato STL , pasarlas por el programa netfabb para verificar que no existan errores sobre la pieza y sobre Flash Print que es el asistente para la impresión.

Junto con las 21 piezas impresas el prototipo cuenta adicionalmente con piezas complementarias como son los 3 resortes y eslabones que tiene cada dedo, los 14 tornillos y



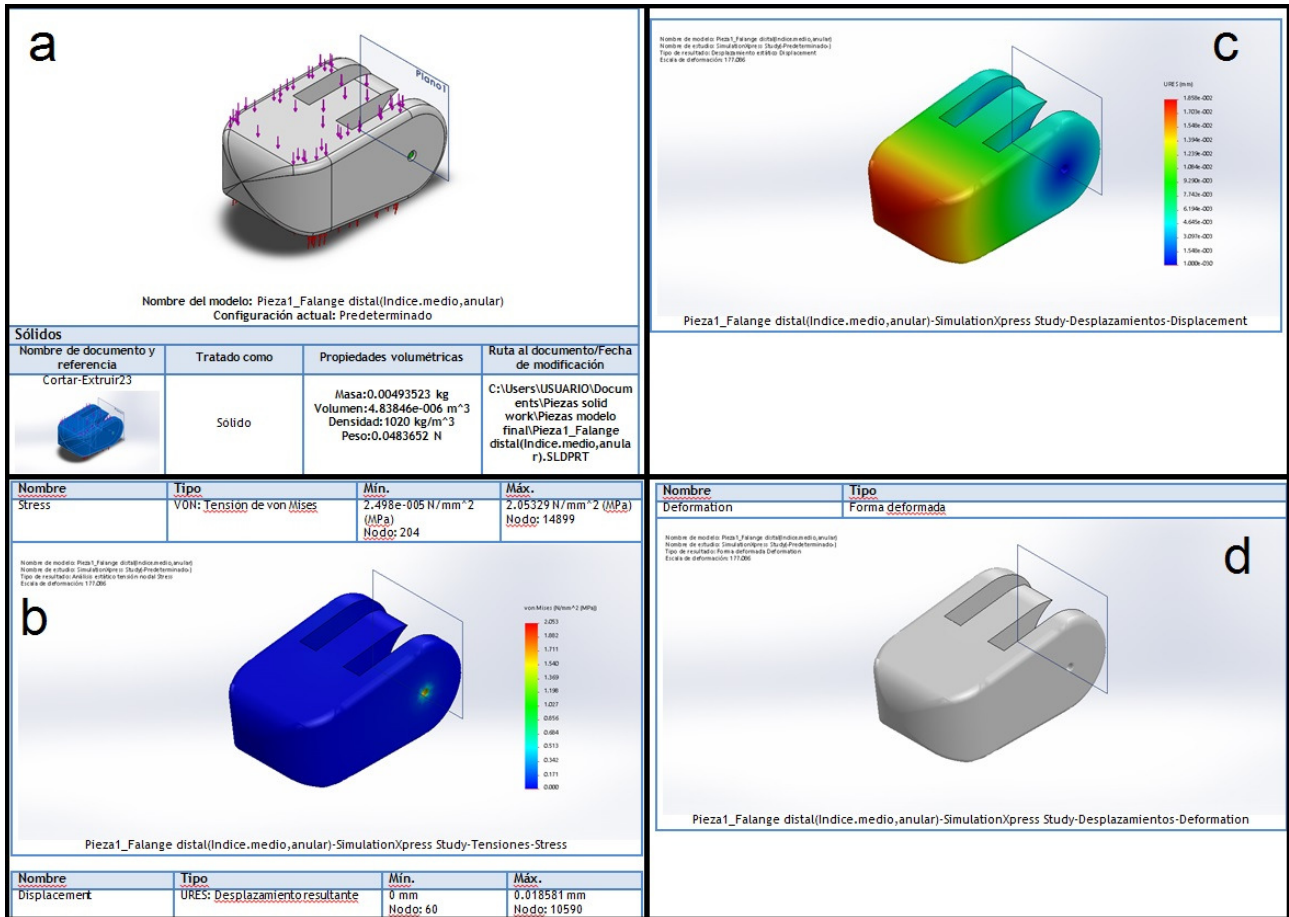


Figura 24. Resultado Simulation Xpress, a) propiedades del sólido, b) estudio de desplazamiento, c) estudio de tensión estrés, d) forma deformada.

Tabla 5

Peso de las piezas del prototipo impreso.

MATERIAL DE IMPRESIÓN	Cantidad	Peso Total [g]
ABS	15	148,92
PLA	6	741,51
TOTAL PROTOTIPO	21	890,43

tuercas para la sujeción del antebrazo, los actuadores que son 6 servomotores y el módulo de control Arduino nano.

Fue necesario el realizar modificaciones sobre las piezas impresas para realizar el montaje del prototipo, como se observa en la Fig. 26, también fue necesario el cortar la pieza ya que al momento del diseño no se dimensiono bien el tamaño del cable de los servomotores, adicional fue necesario el realizar nuevamente los agujeros de los eslabones y sobre los que pasa el hilo nailon ya que en la impresión quedaron muy pequeños, la última modificación que se realiza es el método de conexión entre la mano y el

antebrazo esta fue debido a que al momento de realizar el montaje resulto más práctico dejar el servomotor de forma directa en la mano de como estaba previsto.

El prototipo como se observa en la Fig. 28, debido a los resortes toma una posición natural similar a la de la mano en reposo humana que no es con los dedos totalmente estirados sino un poco recogidos, esto se da por el rango de movimiento del accesorio del servomotor.

Con el prototipo ya construido se realizan diferentes pruebas observando los agarres básicos como se muestran en la Fig. 30 y la articulación de la muñeca como se ve

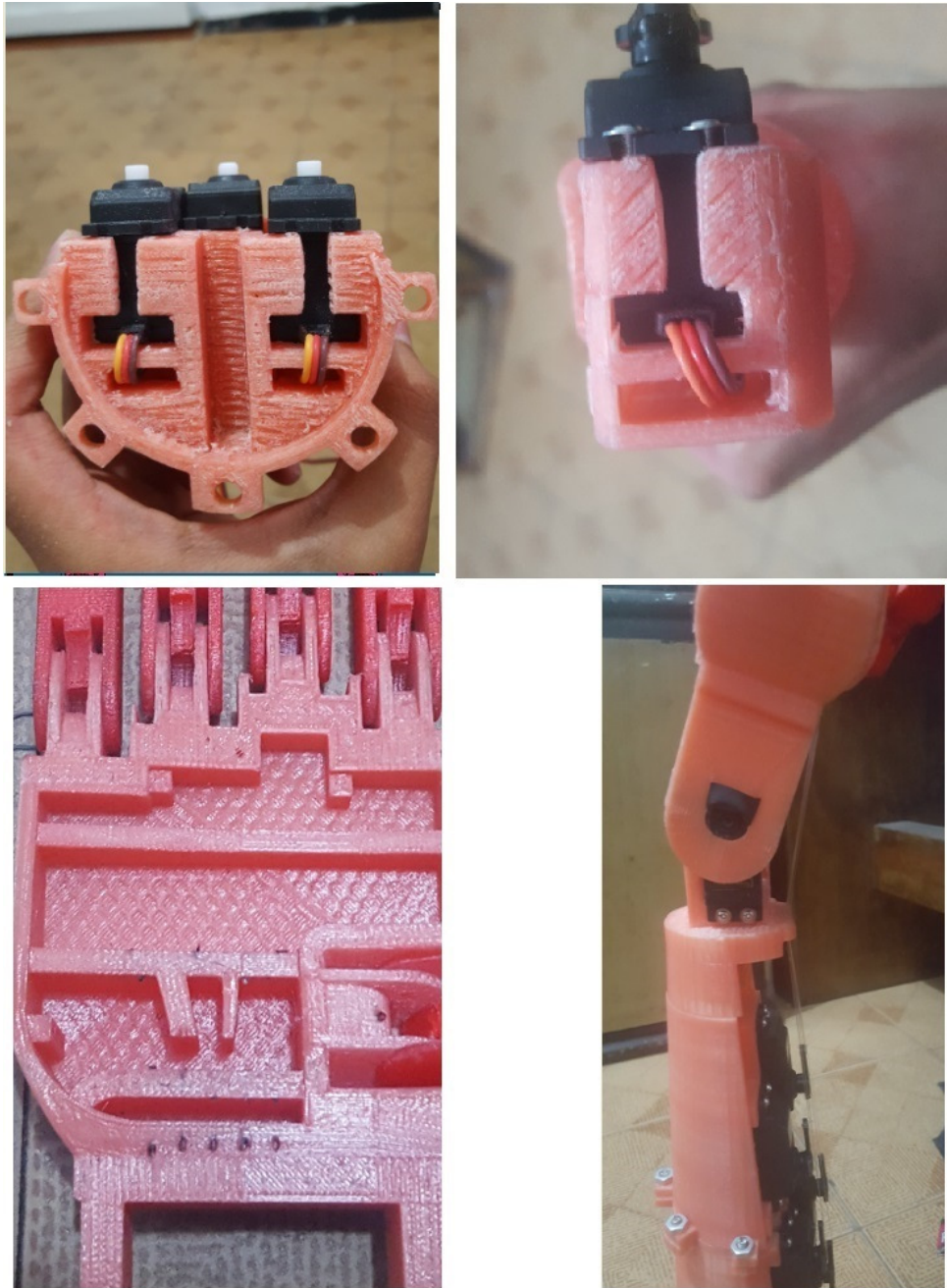


Figura 26. Modificaciones sobre las piezas ya impresas.

en la Fig. 29. Finalmente se obtiene un prototipo funcional, practico para futuros estudios por parte del grupo de investigación ARMOS de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Conclusiones

Este artículo recopila las investigaciones más relevantes dando como resultado un prototipo práctico que adopta características funcionales y morfológicas que imitan a la mano humana. Se observa, además, que no se obtiene una réplica artificial, sino un equivalente basado en el

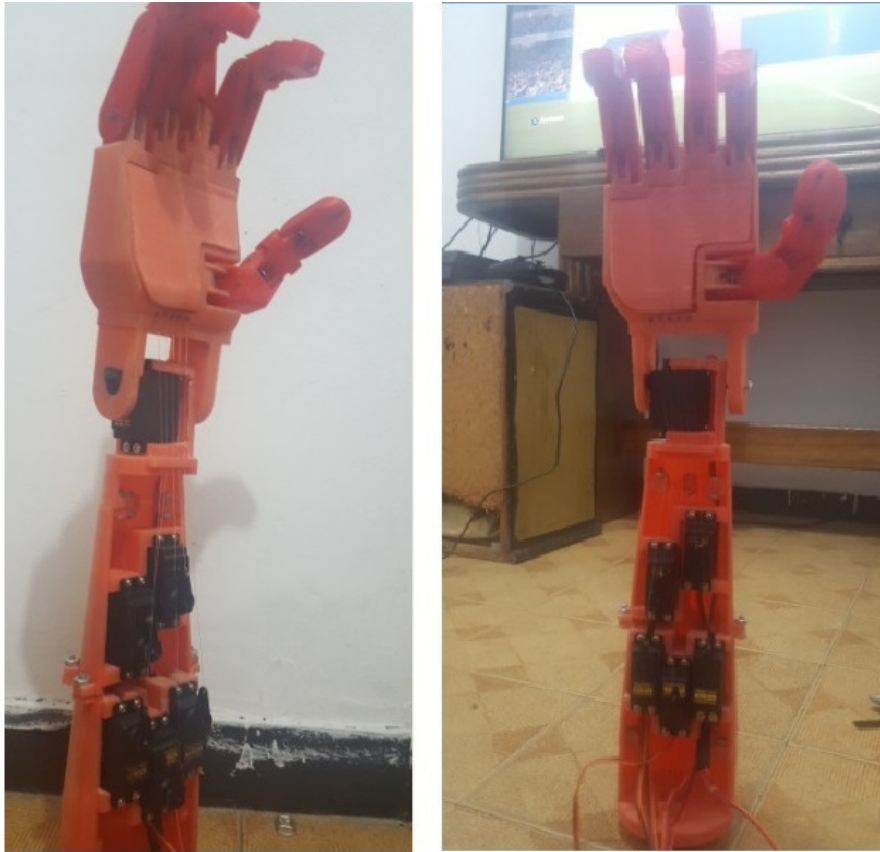


Figura 28. Prototipo finalizado.

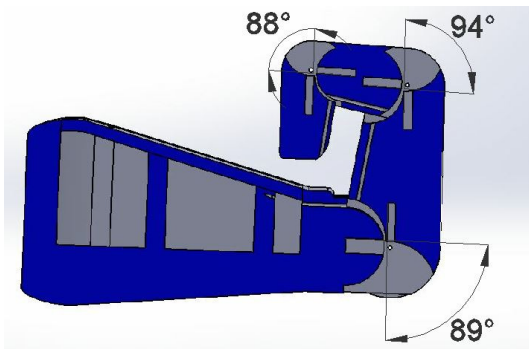


Figura 21. Ángulos límite para los dedos índice, medio, anular y meñique

modelo biológico, que muestra movimientos similares a los humanos.

Se logra definir e implementar los materiales para la construcción del prototipo, además de la selección de los actuadores y demás elementos con el fin de obtener un modelo funcional.

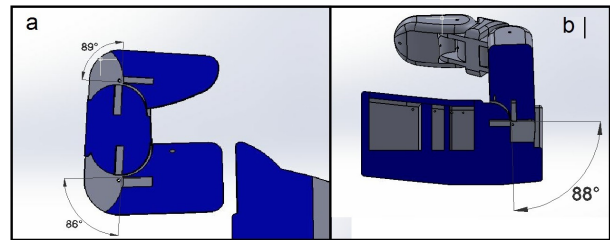


Figura 22. a) Ángulos límite para el pulgar sobre las falanges distal y proximal, b) Ángulo límite para el pulgar sobre el metacarpiano.

Por medio de software especializado se logra el simular y determinar las características más prácticas para obtener el mejor desempeño en la máquina y también el determinar las limitaciones mecánicas de la misma.

Fruto de la investigación se aporta al grupo de investigación ARMOS un prototipo con las características necesarias para ser tema de futuros estudios e investigación, debido a su forma ya que cuenta con superficies amplias en los dedos y la palma para ubicación de sensores o demás



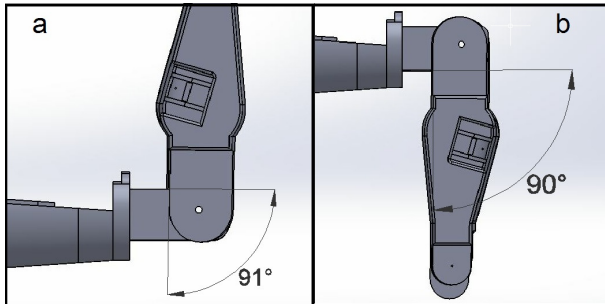


Figura 23. Ángulos límites para la palma, a) flexion, b) extensión.

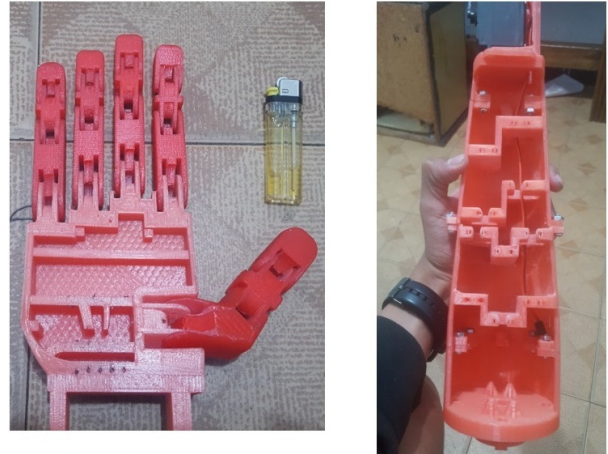


Figura 27. Diferentes etapas de construcción del prototipo.

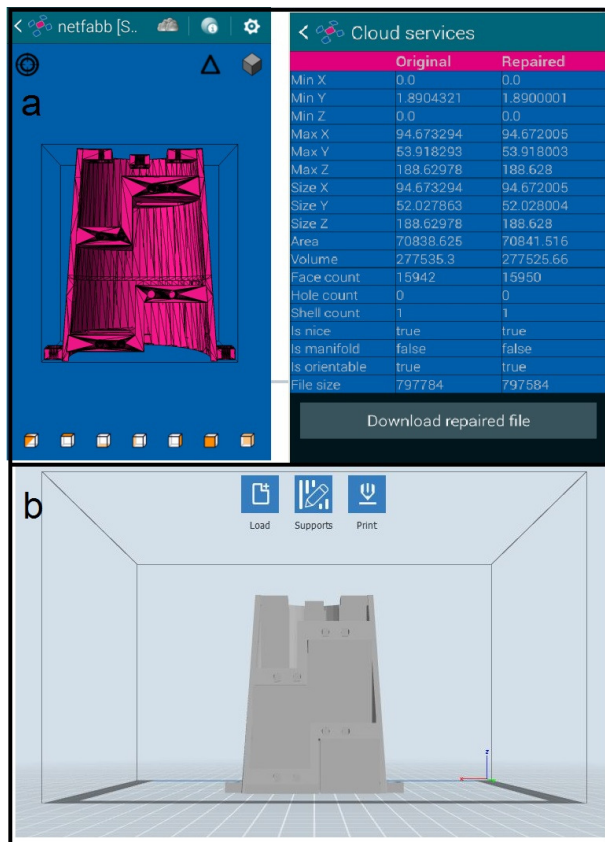


Figura 25. Ejemplo previo a la impresión sobre una de las partes del antebrazo a) netfabb version android, b) Flash Print.

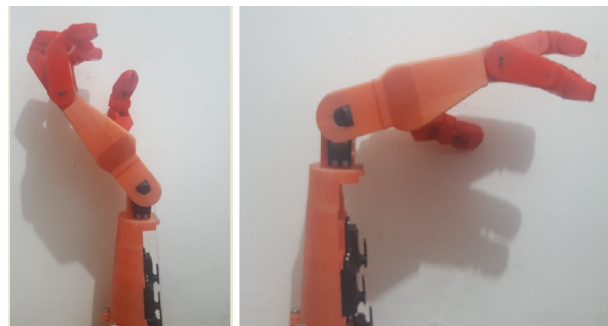


Figura 29. Articulación de la muñeca.

dispositivos, además cuenta con un modo de acople dispuesto con el fin de realizar futuras conexiones con otros prototipos.

### Referencias

Cailliet, R. (2006). *Anatomía funcional biomecánica*. ISBN 9788471014931: Marbán.

Dang, H., Weisz, J., y Allen, P. (2011). Blind grasping: Stable robotic grasping using tactile feedback and hand kinematics. En *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (p. 5917-5922).

Hairong, W., Shaowei, F., y Hong, L. (2012). An anthropomorphic design guideline for the thumb of the dexterous hand. En *International Conference on Mechatronics and Automation*.

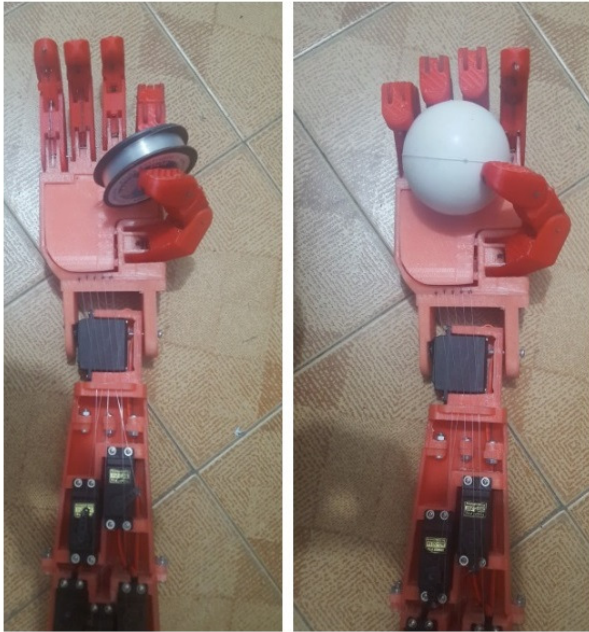


Figura 30. Agarres básicos.

Hyunhwan, J., y Joono, C. (2011). Design of hybrid type robotic hand: The ku hybrid hand. En *2011 11th international conference on control, automation and*

*systems (iccas)* (p. 1113-1116).

Mahmoud, R., Ueno, A., y Tatsumi, S. (2011). An assistive tele-operated anthropomorphic robot hand: Osaka city university hand ii. En *2011 6th acm/ieee international conference on human-robot interaction (hri)* (p. 85-92).

Molina, J. (2016). *Caracterización de materiales termoplásticos de abs y pla semi - rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes*. Tesis de Master no publicada, Escuela politecnica nacional de Quito.

Monk, S. (2011). *Programming arduino getting started with sketches* (McGraw-Hill, Ed.). McGraw-Hill.

Netter, F. (2011). *Netters concise orthopaedic anatomy* (5.<sup>a</sup> ed.; Elsevier, Ed.). Elsevier.

Pérez, M. (2012). Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 65(65), 46-59.

Tondu, B. (2009). Kinematic modelling of anthropomorphic robot upper limb with human-like hands. En *International conference on advanced robotics (icar 2009)* (p. 1-9).

Zuñiga, D., y Andrade, D. (2011). Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas. *Ingenius Revista de ciencia y tecnología*, 6(6), 67-84.

# Sistema de control difuso para motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) sobre hardware embebido

*Fuzzy control system for brushless DC motor (BLDC) on embedded hardware*

Jhon J. Galvis L.  
Universidad de los Andes  
jj.galvis916@uniandes.edu.co

José I. Madrid V.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
madrid@utp.edu.co

---

A diferencia de los motores DC con escobillas, los motores BLDC poseen una dinámica altamente no lineal, lo que dificulta el diseño de esquemas tradicionales de control. Por esta razón, en este artículo se propone el diseño de un esquema de control no lineal de velocidad basado en lógica difusa para la máquina BLDC. El esquema es implementado sobre una plataforma embebida H3 Quad-core Cortex-A7 con una GPU Mali400MP2. El código se desarrolló en Python sobre un OS Linux Debian. Los resultados experimentales muestran que el desempeño del controlador es excelente, eliminando sobrepasos y con una rápida respuesta a cambios de referencia.

*Palabras clave:* BLDC, control difuso, control de velocidad, no lineal

Unlike DC motors with brushes, BLDC motors have highly non-linear dynamics, making it difficult to design traditional control schemes. For this reason, this paper proposes the design of a nonlinear speed control scheme based on fuzzy logic for the BLDC machine. The scheme is implemented on an embedded H3 Quad-core Cortex-A7 platform with a Mali400MP2 GPU. The code was developed in Python on a Debian Linux OS. The experimental results show that the performance of the controller is excellent, eliminating overshoots and with a quick response to changes of reference.

*Keywords:* BLDC, fuzzy control, non-linear, speed control

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Noviembre 4, 2016

**Fecha aceptación del manuscrito:** Diciembre 5, 2016

**Investigación financiada por:** Universidad Tecnológica de Pereira.

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

**Cómo citar:** Galvis, J. y Madrid, J. (2016). *Sistema de control difuso para motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) sobre hardware embebido*. Revista Tekhnê, 13(2), 43-48.

## Introducción

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) son motores eléctricos cuyo funcionamiento se basa en imanes permanentes. El devanado de los motores BLDC se encuentra en el estator, y el imán permanente está en el rotor. El motor conmuta por medio de la posición de rotor detectada por un sensor (sensor Hall). Estas máquinas son la opción perfecta en aplicaciones que requieren alta confiabilidad, alta eficiencia y una buena relación potencia-tamaño, dada su capacidad de suministrar un muy buen torque sobre un amplio rango de velocidades. Con respecto a los motores DC tradicionales con escobillas, poseen curvas de desempeño en velocidad y torque muy similares. Sin embargo, a diferencia de ellos, no poseen contactos mecánicos o escobillas. Esta característica les brinda un menor costo y mayor vida útil con menor mantenimiento, pero exige el uso de un control electrónico, y hace que su modelo de comportamiento sea altamente no lineal (Sang-Hoon, 2017).

Actualmente existe una gran cantidad de investigación alrededor del control de motores, y en particular de los motores BLDC. Las técnicas de control se han beneficiado de los esquemas de control desarrollados para convertidores DC-DC de potencia (Martínez S., 2011). Debido a que los circuitos *drives* requieren alta capacidad de desempeño, en particular en cuanto a precisión y velocidad (Igleheart et al., 2013), entre estos esquemas de control sobresalen herramientas con capacidad sobresaliente para plantas no lineales, como es el caso de la lógica difusa.

Un sistema de control difuso se soporta en reglas de la forma *SI - ENTONCES* para establecer relaciones entre entradas y salidas del sistema de control. Bajo este esquema no es necesario sintonizar parámetros de un sistema de control no lineal, así como tampoco se requiere de un modelo de la planta. Además, las reglas pueden ser definidas de cualquier forma, e incluso para condiciones específicas de operación del sistema.

Esta estrategia de control se ha utilizado ampliamente para el manejo de motores eléctricos. En el caso de máquinas AC, para el caso de los motores de inducción (el motor más usado en la industria) se ha utilizado para mejorar la respuesta dinámica de las máquinas frente a pequeños cambios en la carga o en la velocidad de referencia (Kumar y Febin, 2013; Vahedpour, Ranjbar, y Agheh, 2015; YiMing, Yuebin, Quanfeng, y Wei, 2013).

En cuanto a máquinas DC, el control difuso ha sido importante en esquemas con altas exigencias en el sobrepaso, tiempo de subida, tiempo de establecimiento y error de estado estacionario (Gupta y Varshney, 2013; Valdez, Melin, y Castillo, 2012). Variantes de las máquinas DC, por ejemplo, los motores paso a paso, han utilizado también control difuso para permitir adaptar el comportamiento del sistema de control a variaciones

de operación del sistema y circunstancias de la planta (Ahmadi et al., 2012; Kantawong, 2015).

En el caso de los motores BLCD, es normal la implementación de esquemas híbridos difusos-PID (Faraji y Akbari, 2016; Jianli, Yanchun, y Yinghui, 2016). Esta mezcla busca, igual que antes, mejorar el desempeño del sistema de control en las diferentes zonas de operación del motor. Es de anotar además, que la mayoría de las estrategias documentadas se limitan a simular el comportamiento del esquema (Shyam y Daya, 2013), solo en algunos casos se documenta implementaciones, y muy pocos casos sobre sistemas embebidos (Chao, Yuan, y Hai, 2016; Shanmugasundram, Muhammad, y Yadaiah, 2014; Xiao, 2013).

Un elemento adicional a considerar durante el diseño del control difuso para la máquina BLDC, es que el esquema clásico de control difuso no contempla una estructura integral, su comportamiento es más similar a un bloque de control PD (Proporcional Derivativo) (Jianli et al., 2016). Esto hace que la respuesta dinámica de un bloque de control difuso sea muy buena, incluso trabajando con plantas altamente no lineales, pero hace también que su respuesta estática no sea la mejor. Bajo estas condiciones, un control difuso tradicional no puede producir una respuesta global de alto desempeño, lo cual es lo esperado con el esquema de control embebido propuesto.

Para resolver este problema, se propone un esquema de control difuso híbrido que contemple un componente integral en el bloque de control. De hecho, los sistemas de control difuso son ideales para mezclar esquemas de control híbridos definidos en diferentes zonas de comportamiento, haciendo fácil su integración en un único bloque (Martínez S., Acero S., y Castiblanco, 2010). En este caso, se propone mezclar el esquema de control difuso con un bloque PID (Proporcional, Integral Derivativo) definido cada uno en diferentes zonas de operación, que permita garantizar el desempeño del sistema de control de velocidad sin importar el punto de operación del motor. El particular, el bloque de control difuso se utiliza cuando el error de velocidad es grande, y el bloque de control PID se utiliza cuando el error de velocidad es pequeño (Jianli et al., 2016; Martínez S. et al., 2010).

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se presentan algunos conceptos preliminares, el perfil funcional del prototipo, y algunas otras consideraciones de diseño. En la Sección 3 se detalla completamente el diseño de la estructura del prototipo, incluyendo los criterios de selección y las especificaciones finales adoptadas. En la Sección 4 se presenta la evaluación del desempeño observado en laboratorio del prototipo. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo.

## Formulación del problema

En el motor BLDC el flujo se produce por la corriente a través del imán permanente, y su naturaleza es no lineal. Por lo tanto, el sistema de control de velocidad del motor BLDC debe ser capaz de adaptarse al comportamiento no lineal de la máquina, y producir una buena respuesta dinámica. Además, la energización de las bobinas se sincroniza a partir de la señal de un sensor de efecto Hall que permite estimar la velocidad. En este motor la fuerza contra-electromotriz tiene forma trapezoidal.

El control de velocidad de la máquina corresponde a un control vectorial. Se debe utilizar los valores de voltaje y corriente de la máquina para ajustar la velocidad del rotor. La señal de control se aplica a través de un inversor trifásico sobre las bobinas del estator. La respuesta del motor BLDC esta altamente influenciada por variaciones en la carga y en los parámetros del sistema. Los esquemas de control tradicionales se diseñan sobre modelos linealizados del motor, por lo cual solo son adecuados para sistemas simples sin altos requerimientos en operación estática.

Las ecuaciones de voltaje del motor BLDC son las siguientes (ecu. 1) (Shyam y Daya, 2013):

$$\begin{aligned} V_1 &= i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1,2} \frac{di_2}{dt} + M_{1,3} \frac{di_3}{dt} + e_1 \\ V_2 &= i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{2,1} \frac{di_1}{dt} + M_{2,3} \frac{di_3}{dt} + e_2 \\ V_3 &= i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{3,1} \frac{di_1}{dt} + M_{3,2} \frac{di_2}{dt} + e_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$  son las fuerzas contra-electromotriz que son función del ángulo del rotor, el cual esta dado por (ecu. 2):

$$e = K_e \times \omega_m \quad (2)$$

$K_e$  es la constante de fuerza contra-electromotriz. Este modelo matemático se puede representar de la siguiente forma (ecu. 3):

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & M_{1,3} \\ M_{2,1} & L_2 & M_{2,3} \\ M_{3,1} & M_{3,2} & L_3 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ahora, las inductancias son independientes de la posición del rotor, por lo tanto (ecu. 4):

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 = L_3 = L \\ M_{1,2} &= M_{2,1} = M_{1,3} = M_{3,1} = M_{2,3} = M_{3,2} = M \end{aligned} \quad (4)$$

Y, si el sistema es balanceado (ecu. 5):

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad (5)$$

Re-escribiendo la ecu. 3 se obtiene (ecu. 6):

$$\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

El torque electromagnético esta dado por (ecu. 7):

$$T_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + \beta \omega_r + T_l \quad (7)$$

Este torque electromagnético depende de la fuerza contra-electromotriz, donde la relación con la corriente se puede escribir como (ecu. 8):

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_m} [e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3] \quad (8)$$

La función de transferencia del motor BLDC se escribe como (ecu. 9):

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1} \quad (9)$$

Donde  $T_m$  es la constante mecánica de tiempo y  $T_e$  es la constante eléctrica de tiempo.

## Metodología

La Fig. 1 muestra un diagrama esquemático del sistema de control propuesto. La velocidad del motor es sensada continuamente por medio de sensores Hall. La unidad de control calcula el error de velocidad, y de acuerdo a su valor, y los vectores de corriente y fuerza contra-electromotriz, estima la secuencia de conmutación para el inversor (los seis pulsos de disparo de los IGBTs) de acuerdo a las reglas difusas (mezcla las superficies de control difuso para grandes valores de error, con las del control PID para pequeños valores de error). En la secuencia de conmutación trifásica, solo dos fases del motor BLDC conducen en un determinado instante.

El sistema de control híbrido difuso-PID contempla dos variables de entrada: el error de velocidad  $e$  y el cambio en este error  $de$ , y una variable de salida  $V_{ref}$  que es un voltaje de referencia del lazo de voltaje, que se utiliza para calcular la secuencia de pulsos de disparo del inversor. Se define un total de cinco conjuntos difusos para cada una de las variables difusas así: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (Z), Positivo Pequeño (PP) y Positivo Grande (PG). Las variables de entrada y salida son escaladas y normalizadas dentro de su propio universo de discurso. Las funciones de pertenencia utilizadas en el control para las variables de entrada y salida se muestran en la Fig. 2.

El esquema de control híbrido difuso-PID utiliza la inferencia difusa de Sugeno (Takagi-Sugeno-Kang) en la máquina de inferencia. Se utiliza Sugeno en lugar de la clásica inferencia de Mamdani debido a la estructura híbrida

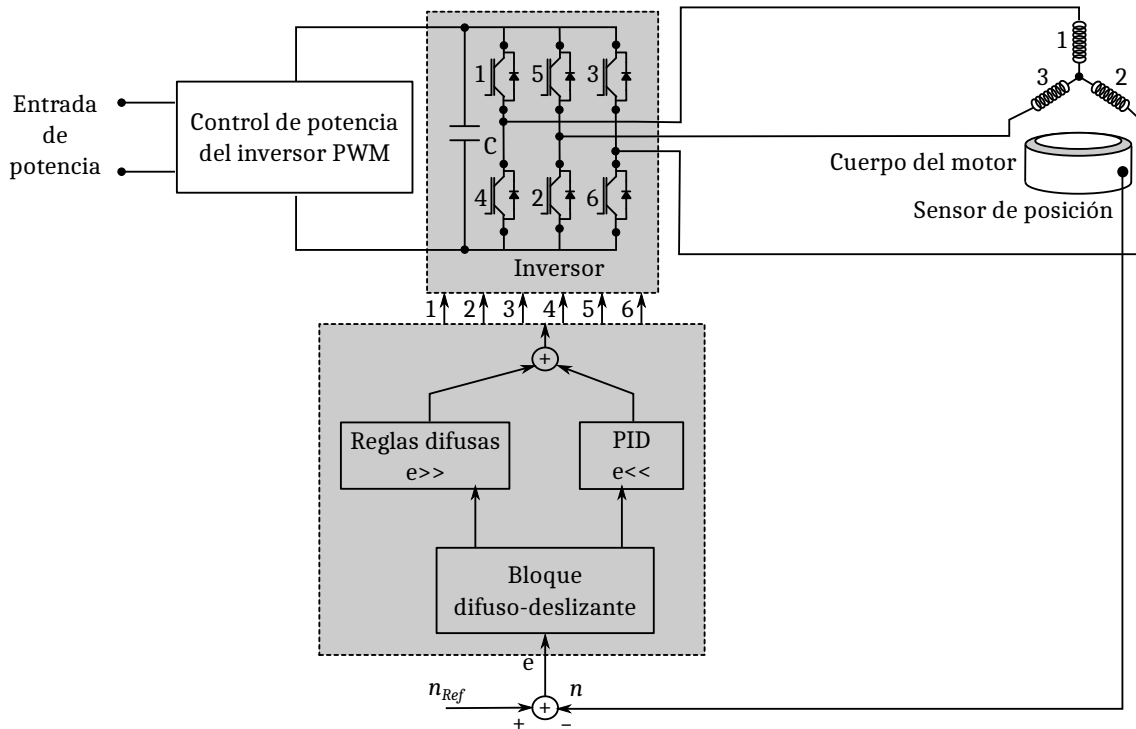


Figura 1. Diagrama del esquema de control difuso propuesto.

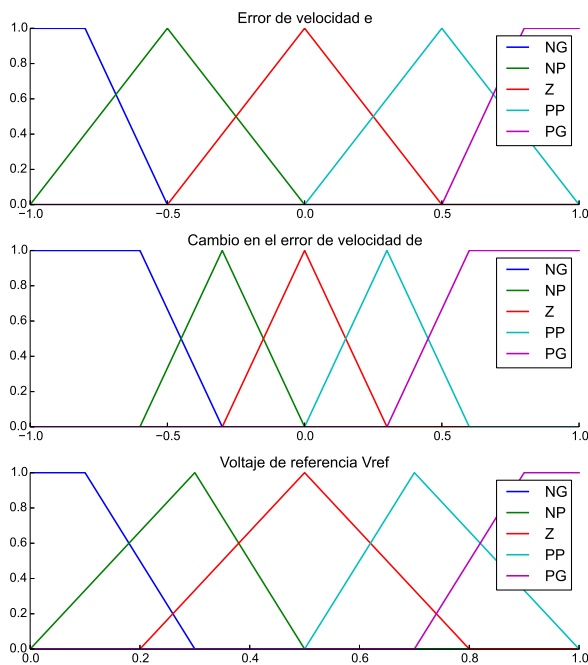


Figura 2. Funciones de pertenencia para las variables de entrada y salida.

del control. En Sugeno las funciones de pertenencia de salida pueden ser tanto constantes como funciones lineales,

permitiendo combinar las dos superficies de control dentro de un único conjunto de reglas difusas. Las reglas de control reducen la energía del sistema de acuerdo al comportamiento clásico del control difuso cuando el error de velocidad es grande, y aplican el control lineal PID cuando el error de velocidad es pequeño. La tabla 1 muestra las reglas de control definidas para el esquema propuesto.

Tabla 1  
Base de reglas difusas.

<i>e/de</i>	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NP	PID	NP	Z
NP	NG	NP	PID	Z	PP
Z	NP	NP	PID	PP	PP
PP	NP	Z	PID	PP	PG
PG	Z	PP	PID	PP	PG

Los valores de  $K_p$  (constante proporcional),  $K_i$  (constante integral) y  $K_d$  (constante diferencial) del bloque PID (se utilizó una estructura paralela) se determinaron mediante la regla de Ziegler-Nichols, y haciendo uso de la función de transferencia del motor BLDC.

La unidad de control se estructuró sobre una plataforma embebida soportada por el procesador H3 Quad-core Cortex-A7 con una GPU Mali400MP2. Sobre dicha plataforma se instaló un OS Linux Debian. El esquema de



control fue simulado en Python con ayuda de SciKit-Fuzzy y Numpy. El resultado de esta simulación (voltaje de referencia) fue almacenado como una tabla direccionada por los valores digitalizados de error de velocidad y variación del error.

El código de control se desarrolló en Python. Este código se encarga de leer la velocidad, calcular el error de velocidad, calcular la variación de error de acuerdo a la historia de la variable, aplicar el esquema de control, y generar las señales de disparo para el inversor. También visualiza en pantalla (conexión directa por HDMI) el comportamiento de las variables.

### Resultados

Para verificar el desempeño del esquema de control difuso-PID se construyó en laboratorio un prototipo de control y un circuito *drive*. Para la unidad de control se utiliza un hardware embebido de arquitectura ARM de 32 bits con OS gráfico y acceso en tiempo real a los puertos. El código de control esta escrito en Python, y tiene comunicación directa con el circuito *drive*. El circuito *drive* alimenta a un inversor trifásico en puente completo, que recibe potencia desde un bus DC de 42 V.

La velocidad del motor controlado es medida por medio de un encoder acoplado al eje del motor. Esta señal es alimentada también a la unidad de control para evaluación de desempeño y visualización.

El desempeño se evaluó por medio del ajuste programado de la señal de referencia de velocidad. Luego de estar en estado estacionario a una velocidad de 1500 rpm, se aplica un paso a la referencia para modificar dicho valor a 2000 rpm. Esta señal de referencia se mantiene por 30 segundos, tiempo luego del cual se ajusta nuevamente a 1500 rpm (Fig. 3). Este comportamiento permite evaluar el desempeño tanto estático como dinámico del esquema de control, dado que se observa tanto el comportamiento transitorio como el error en estado estacionario.

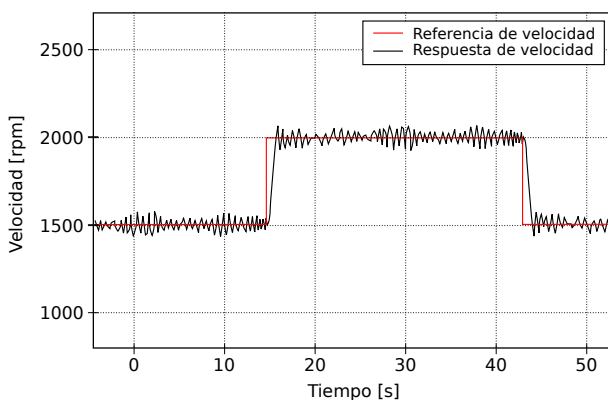


Figura 3. Respuesta del motor frente a cambios escalones en la referencia de velocidad.

La Fig. 3 muestra el comportamiento registrado por el sistema frente a esta señal de prueba. Filtrando el ruido de estado estacionario, el sistema no presenta error de estado estacionario. La velocidad del motor sigue a la referencia con un retardo inferior a los dos segundos sin sobre-pasos. El retardo de la respuesta fue inferior siempre a los 500 ms.

### Conclusiones

Este artículo propone un esquema de control híbrido difuso-PID para el control de un motor BLDC. Se describen los detalles del esquema así como su implementación en un prototipo de laboratorio y su desempeño real en respuestas estáticas y dinámicas. El esquema de control propuesto se implementa sobre una plataforma embebida ARM de 32 bits, con ejecución en tiempo real del algoritmo. La velocidad de respuesta se logra simulando *off line* todos los posibles comportamientos de las variables de estado, y almacenando los resultados del control en una tabla cuya dirección de búsqueda se construye a partir de las señales de entrada del sistema. Los resultados sobre el prototipo muestran un excelente comportamiento del esquema de control frente a cambios rápidos en la referencia de velocidad.

### Referencias

- Ahmadi, A., Tousizadeh, M., Mehdi, a., Fadzli, M., Buyamin, S., y Abd, H. (2012). Designing an optimal fuzzy-pid controller for speed tracking of stepper motor. En *Ieee symposium on industrial electronics and applications (isiea 2012)* (p. 193-198).
- Chao, C., Yuan, W., y Hai, L. (2016). Siso pid-fuzzy controller for bldc motor speed control base on low cost msp430 solution. En *5th international symposium on next-generation electronics (isne 2016)* (p. 1-2).
- Faraji, I., y Akbari, M. (2016). Adaptive speed control of brushless dc (bldc) motor based on interval type-2 fuzzy logic. En *24th iranian conference on electrical engineering (icee 2016)* (p. 1119-1124).
- Gupta, S., y Varshney, P. (2013). Fractional fuzzy pid controller for speed control of dc motor. En *Third international conference on advances in computing and communications (icacc 2013)* (p. 1-4).
- Igleheart, C., Marques, J., Ramirez-Leon, C., Li, Y., Ashrafzadeh, F., y Wilson, S. (2013). A robust pid-type fuzzy logic controller for variable speed motor drives. En *North american power symposium (naps 2013)* (p. 1-6).
- Jianli, J., Yanchun, W., y Yinghui, H. (2016). The fuzzy-pid control of brushless dc motor. En *Ieee international conference on mechatronics and automation (icma 2016)* (p. 1440-1444).
- Kantawong, S. (2015). Smart men tailoring dummy robot using dc stepper motor with rfid and fuzzy-pid control system. En *2nd international conference*

*on advanced informatics: Concepts, theory and applications (icaicta 2015)* (p. 1-6).

- Kumar, R., y Febin, J. (2013). A novel self - tuning fuzzy based pid controller for speed control of induction motor drive. En *International conference on control communication and computing (iccc 2013)* (p. 62-67).
- Martinez S., F. H. (2011). *Algunas aplicaciones de la lógica difusa en el control de convertidores dc/dc*. Distrital University Francisco José de Caldas. (ISBN 978-958-8723-08-2)
- Martinez S., F. H., Acero S., D. M., y Castiblanco, M. (2010, August). Hybrid fuzzy-sliding scheme for the balance control of a biped robot. En D.-S. Huang, X. Zhang, C. Reyes García, y L. Zhang (Eds.), *Lecture notes in artificial intelligence 6216. advanced intelligent computing theories and applications with aspects of artificial intelligence* (Vol. 6216, p. 434-441). Springer Berlin Heidelberg. Descargado de [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14932-0\\_54](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14932-0_54)
- Sang-Hoon, K. (2017). *Electric motor control: Dc, ac, and bldc motors* (1.<sup>a</sup> ed.). Elsevier Science.
- Shanmugasundram, R., Muhammad, K., y Yadaiah, N. (2014). Implementation and performance analysis of digital controllers for brushless dc motor drives. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(1), 213-224.
- Shyam, A., y Daya, F. (2013). A comparative study on the speed response of bldc motor using conventional pi controller, anti-windup pi controller and fuzzy controller. En *International conference on control communication and computing (iccc 2013)* (p. 68-73).
- Vahedpour, M., Ranjbar, A., y Agheh, H. (2015). Comparison between performance of conventional, fuzzy and fractional order pid controllers in practical speed control of induction motor. En *2nd international conference on knowledge-based engineering and innovation (kbei 2015)* (p. 912-916).
- Valdez, F., Melin, P., y Castillo, O. (2012). Particle swarm optimization for designing an optimal fuzzy logic controller of a dc motor. En *Annual meeting of the north american fuzzy information processing society (nafips 2012)* (p. 1-6).
- Xiao, H. (2013). Research of the fuzzy control system for brushless dc motor based on tms320f2407. En *5th international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics (ihmsc 2013)* (p. 385-387).
- YiMing, L., Yuebin, W., Quanfeng, Y., y Wei, H. (2013). The technology study of fuzzy control system for asynchronous motor. En *3rd international conference on consumer electronics, communications and networks (cecnet 2013)* (p. 710-713).





# Robot semi-autónomo para el transporte de pacientes con movilidad reducida

*Semi-autonomous robot for the transport of patients with reduced mobility*

Óscar E. González R.  
Universidad Pedagógica Nacional  
oeg8090@hotmail.com

Diego M. Acero S.  
Universidad Pedagógica Nacional  
dacero@pedagogica.edu.co

---

Este artículo documenta el diseño y desarrollo de un prototipo robótico semi-autónomo para el transporte de pacientes con movilidad reducida en un lugar específico, como vivienda, lugar de estudio o trabajo. El perfil de diseño consideró un módulo de tracción diferencial, un módulo de sensores de proximidad, un módulo de control de sistemas de tracción, comando y el modelo del entorno. El sistema posee herramientas embebidas soportadas en microcontroladores, procesadores con arquitectura ARM, y un computador personal. El código se desarrolló en Python sobre sistemas Linux Debian. Las pruebas de desempeño se aplicaron a un prototipo real de laboratorio, sobre el cual se demostró su funcionamiento.

*Palabras clave:* Control, creación de ruta, discapacidad, prototipo robótico, sensores

This paper documents the design and development of a semi-autonomous robotic prototype for the transport of patients with reduced mobility in a specific place, such as housing, place of study or work. The design profile considered a differential traction module, a proximity sensors module, a control of traction systems module, command and the model of the environment. The system has embedded tools supported in microcontrollers, processors with ARM architecture, and a personal computer. The code was developed in Python on Debian Linux systems. The performance tests were applied to a real laboratory prototype, on which its functioning was demonstrated.

*Keywords:* Control, disability, robotic prototype, route creation, sensors

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Noviembre 4, 2016

**Fecha aceptación del manuscrito:** Diciembre 5, 2016

**Investigación financiada por:** Universidad Pedagógica Nacional.

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

**Cómo citar:** González, O. y Acero, D. (2016). *Robot semi-autónomo para el transporte de pacientes con movilidad reducida*. Revista Tekhnê, 13(2), 49-63.

## Introducción

El diseño e implementación de un prototipo robótico semi-autónomo se realiza con el propósito de dar una propuesta tecnológica que ayude al traslado y desplazamiento de personas con movilidad reducida, que no cuentan con la movilidad suficiente para accionar los dispositivos ya implementados como joystick, botones, palancas cefálicas entre otras (Challagundla, Yogeshwar, y Harsha, 2014).

Según el *Informe mundial sobre la discapacidad* realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS y BM, 2011), más de mil millones de personas viven en todo el mundo con alguna forma de discapacidad. De ellas, casi 200 millones experimentan dificultades considerables en su funcionamiento. En Colombia según el DANE el 11 % de la población colombiana padece algún tipo de discapacidad, y el 4 % presentan una discapacidad física que les impide movilizarse.

La implementación del prototipo robótico es relevante y marca procesos de desarrollo técnico interesantes (Reddy, Bhatia, y Venkateswara, 2016). En el diseño se utilizaron herramientas computacionales, tarjetas de desarrollo, sensores de ultrasonido y tipo láser de bajo costo como sensores de soporte (Ollero, 2001). Se determinó la mejor forma adquisición de datos sobre el entorno donde se desplaza el prototipo, de igual forma se diseñó un algoritmo computacional el cual calcula por el algoritmo de Tremaux con el método pathfinding A\* para la navegación (Florczyk, 2005).

Este es un algoritmo geométrico que ayuda a definir la ruta más corta desde el punto donde está el prototipo, al punto donde se quiere llegar (Barrientos, Peñin, Balaguer, y Aracil, 2007). El algoritmo fue implementado en lenguaje Python, Matlab y C#, lo que garantiza operación multiplataforma y flexibilidad. Sin embargo, el prototipo final solo utiliza lenguaje Python.

La aplicación del proyecto es clara y busca aprovechar las herramientas tecnológicas y computacionales para brindar a un tipo de población específica una herramienta que facilite su desplazamiento autónomo en lugares previamente designados (Rasbridge, 2016). En la parte técnica se encontraron retos como, la navegación y ruta del prototipo de un punto A a un punto B (Crawley, 2012). Estas soluciones incluyen sensores con láser formados con cámaras de bajo coste (García, 2012).

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se plantea y justifica la necesidad evidenciada, el perfil funcional del prototipo, y algunas otras consideraciones teóricas. En la Sección 3 se describen dos prototipos, y el producto final; en este se plantean los problemas técnicos así como las soluciones propuestas, se detalla la implementación de los sensores de distancia láser y ultrasónicos, el método de creación de la ruta entre los

puntos deseados, los alcances de cada prototipo y las mejoras finales. En la Sección 4 se encuentran las pruebas simuladas y reales sobre el prototipo, adicionalmente se proponen futuros desarrollos. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo.

## Formulación del problema

Aunque en la actualidad existen muchas alternativas tecnológicas que facilitan la vida de aquellos que presentan alguna disminución de las capacidades motoras aún hay falencias para aquellos que tienen altos grados de discapacidad donde se necesitan ayudas técnicas tan específicas que se hace difícil encontrar una solución en las ya creadas. Este es el caso de patologías o traumas tan severos que limitan el movimiento o lo hacen inexacto.

Estas personas sin una ayuda técnica adecuada estarían relegadas a permanecer confinados en un establecimiento médico o permanentemente en una cama de su hogar, limitando sus diferentes ámbitos de su vida.

El diseño e implementación del prototipo de robot semi-autónomo para el transporte de pacientes con movilidad reducida, se hace necesario ya que cubre las necesidades de desplazamiento de aquellas personas que por razones médicas no se pueden movilizar por sus propios medios en los ambientes habitacionales, donde más se desenvuelve como vivienda, lugar de estudio o trabajo. Por ser un prototipo semi-autónomo garantiza que con una mínima interacción del usuario se pueda llegar de un punto A previamente designado a un punto B. Este prototipo busca dar mayor independencia de movimiento.

Se busca que el robot sea programable a un lugar específico, ejemplo vivienda, lugar de estudio o trabajo. Dentro de estos lugares se espera que se pueda identificar los lugares más relevantes con puntos específicos donde el usuario podrá seleccionarlos por medio de un celular, donde se mostrará el plano del lugar resaltando los posibles lugares por donde se puede desplazar el prototipo. El sistema debe ser capaz de buscar la mejor ruta, identificar obstáculos y re-definir la ruta hasta llegar al lugar seleccionado.

Este prototipo de robot se divide en los siguientes módulos:

### Módulo de Control

El módulo de control tendrá como objetivo conducir el prototipo hasta una posición previamente configurada mientras evita los choques con los obstáculos detectados por los sensores. Además estará encargado de generar un modelo del entorno para tener un desplazamiento más eficaz y dinámico.

Este módulo de control se compone de un computador portátil en el cual se guarda la matriz que representa el plano del sitio previamente configurado. Sobre ella se realiza

el proceso de búsqueda de ruta y toma de decisiones. Éste módulo también está integrado por la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi ® que se encarga de la medición de distancia por medio de los ultrasonidos, de encender los láser de acuerdo a lo indicado por el computador, y de la comunicación del computador y el microcontrolador PIC ® encargado de los *encoder* y PWM de los motores.

### Módulo de desplazamiento

Posee dos motores eléctricos de corriente continua con tracción diferencial. Los dos motores de tracción serán controlados por un *driver* de 24 V a 12 A, y dos ruedas libres que permitirán la dirección.

### Módulos de comunicación

Este módulo está integrado con diferentes tipos de comunicación. La primera entre el computador y la Raspberry Pi. El sistema se conforma por un cable USB a RS232. La segunda está integrada por un sistema *bluetooth* que conecta al celular y el computador. Finalmente, el tercero es de comunicación paralela entre la Raspberry Pi y el PIC que controla las funciones de desplazamiento del motor.

### Metodología

#### Primer prototipo

El desarrollo del prototipo se realizó sobre los microcontroladores PIC 16F877A, 18F2550 y 18F4550. Se seleccionó también motores Pololu de 1 kg, sensores ultrasónicos SH-04, una base de madera, batería lipo de dos celdas, *driver* para los motores L293 y reguladores de 5V (Pololu, 2008).

El mapa por donde se desplazara el prototipo es representado en una matriz  $m \times n$  determinada por el ambiente, donde el numero uno serán paredes u obstáculos. El número cinco será el punto de llegada, este punto de llegada en este prototipo solo se ingresa por medio de programación en lenguaje C#. el punto de partida se determinó con el número 30, y los lugares por donde se podría llegar a desplazar son designados con cero. Estos valores se determinaron aleatoriamente y no tienen ningún trasfondo técnico (Fig. 1).

```

mapa =
    1   1   1   1   1   1   1   1
    1   0   0   0   0   0   5   1
    1   0   0   0   0   0   0   0
    1  30   1   0   1   1   1   1
    1   0   0   0   0   0   0   1
    1   1   1   1   1   1   1   1
    
```

Figura 1. Matriz representativa de mapa.

Como primer paso se halla la posición de salida por medio de un ciclo que entrega fila y columna donde se encuentra el prototipo. Luego se inicia el proceso para crear el vector de la ruta idónea. Este proceso inicia preguntando si la posición de llegada es la misma de partida, ya que puede ocurrir que el usuario determine el mismo punto. Si no lo es, el algoritmo determina si hay espacio para desplazarse hacia la izquierda, derecha, atrás o adelante (Fig. 2).

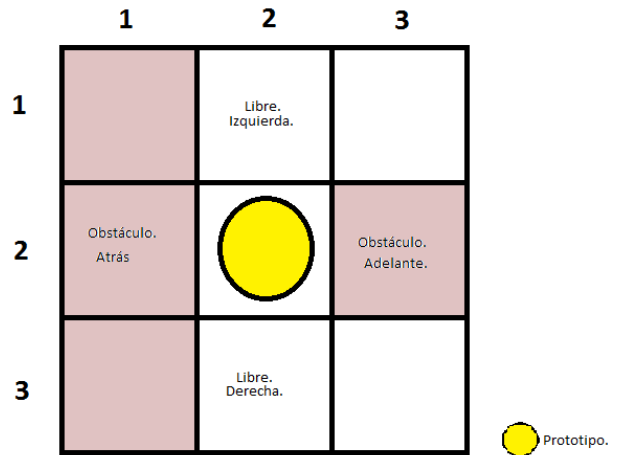


Figura 2. Representación de obstáculos fijos y espacios libres en el mapa cargado al prototipo.

Si hay más de una opción, se guarda la posición, ya que si el camino seleccionado no es el correcto se retrocederá a esta posición para buscar otra posible opción de ruta. Luego, se avanza según la secuencia determinada que marca la siguiente prioridad: adelante, derecha, atrás e izquierda (esta secuencia es arbitraria definida por el programador). Por ejemplo, si el prototipo pudiera girar a la derecha y a la izquierda, el programa determinaría que se dirija a la derecha.

No obstante esto, no implica que el prototipo tenga que realizar estos desplazamientos, ya que estos procesos se realizan en la matriz representativa del mapa. Cuando se selecciona la posición, se reinicia el proceso de preguntar si las posiciones aledañas están disponibles, así hasta que encuentre la ruta hasta la posición deseada. Cuando se crea el vector de ruta otro algoritmo se encarga de determinar los giros y desplazamientos del prototipo (Figs. 3 y 4).

**Algoritmo de dirección de acuerdo a vector de ruta hallada.** Antes de iniciar el desplazamiento, el prototipo lee los sensores de ultrasonido. Si no hay ningún obstáculo a menos de 20 cm, se inicia la marcha. Cada vez que se ejecute una orden de movimiento el sensor medirá la distancia.

El vector de dirección entregado en el proceso anterior da los valores de la posición del prototipo hasta el punto de llegada. No obstante, estos valores no son interpretados, ni da las características de los giros que debe dar el prototipo, ya

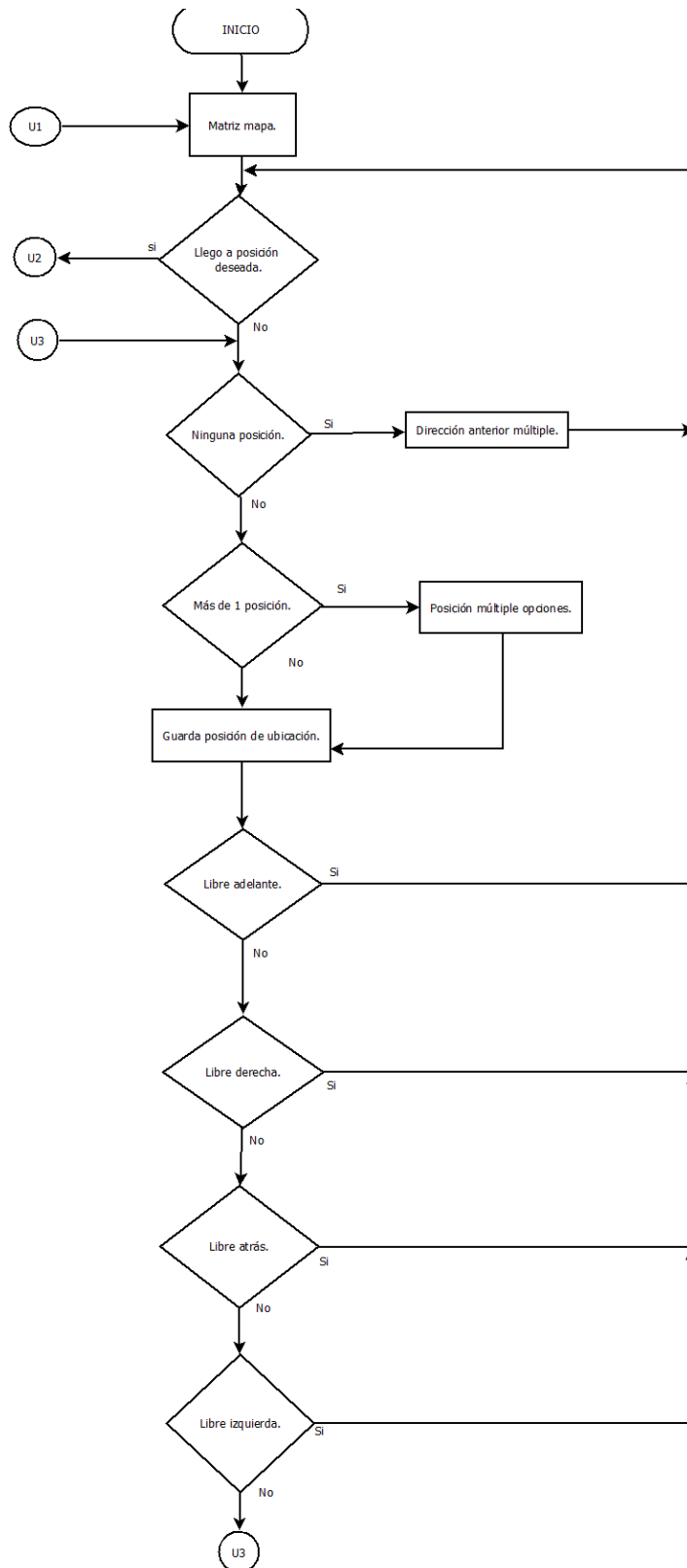


Figura 3. Flujograma proceso creación de ruta del prototipo.

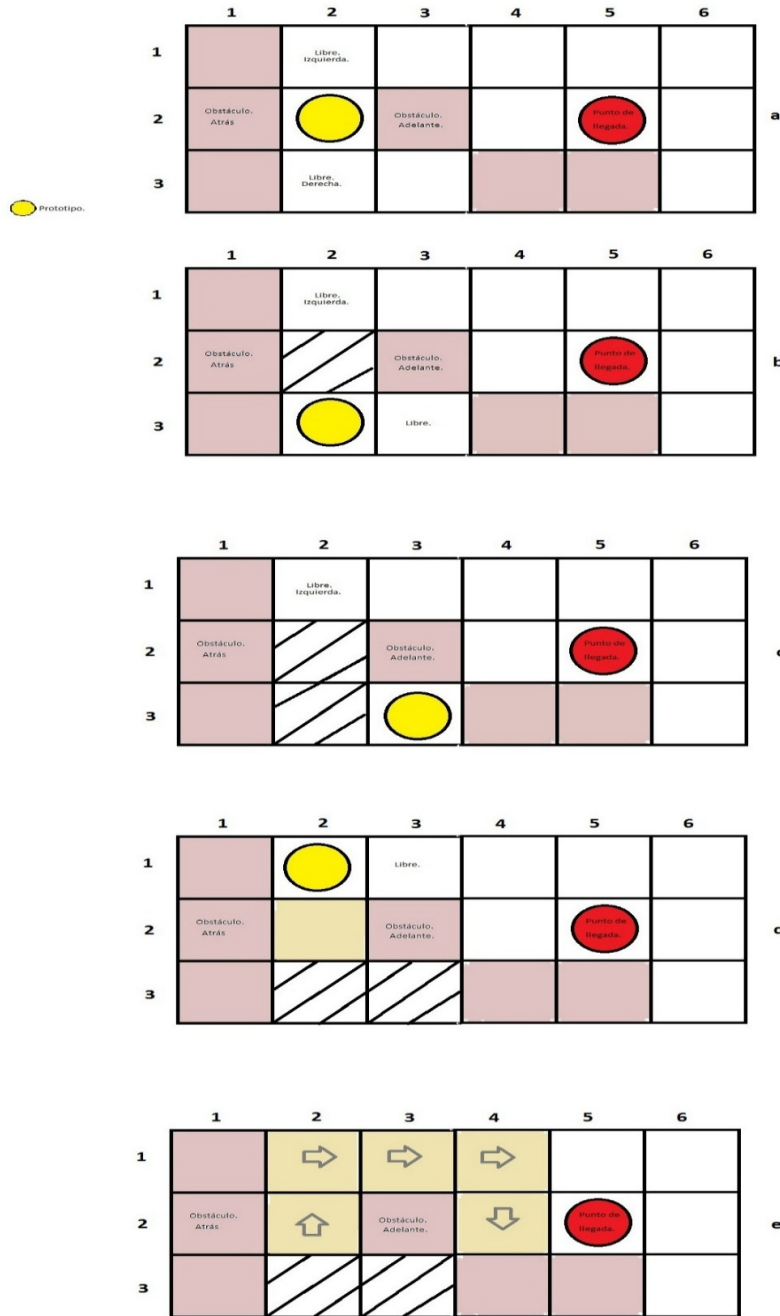


Figura 4. Ejemplo creación de ruta.

que este no es capaz de desplazarse en todas las direcciones sin hacer giros sobre su propio eje (Fig. 5 y tabla 1).

Tabla 1  
 Matriz de posiciones del ejemplo.

Fila	2	1	1	1	2	2
Columna	2	2	3	4	4	5

En este ejemplo de mapa y vector resultante de dirección de posiciones, se observa que el prototipo estaría de frente a un obstáculo. Si aumenta la posición de la columna, provocaría que se estrellara con el obstáculo, o simplemente no se generaría movimiento debido a la condición de la mínima distancia de los sensores ultrasónicos. Para generar un desplazamiento acorde se debería seguir la siguiente secuencia: giro a la izquierda, avance adelante, giro derecha, avance adelante, avance adelante, giro derecha, avance

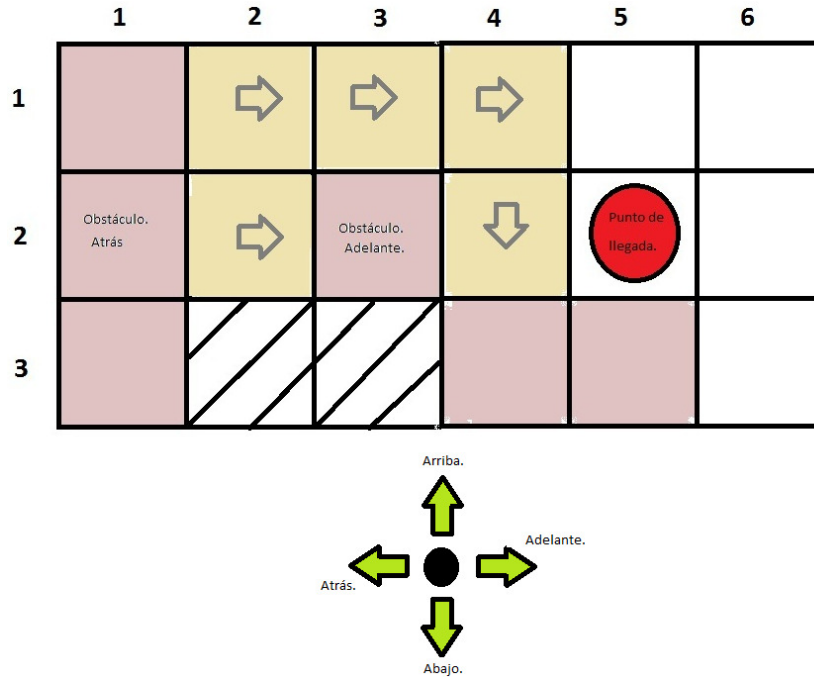


Figura 5. Ruta hallada con algoritmo implementado.

adelante, giro a la izquierda y por ultimo avance adelante. El algoritmo que se diseñó se basa en el sentido del prototipo y los cambios entre las filas y columnas. Este algoritmo tiene una complejidad especial ya que al dar un giro sea cual sea el sentido este cambia la disposición del mapa (Fig. 6).

El sentido del prototipo es importante. Para procesos de orientación se designarían cuatro sentidos: frente, atrás, arriba y abajo. Con esto es posible saber la orientación frente al mapa. Luego de cada posición, y de acuerdo a los cambios entre filas y columnas, se puede determinar si al avanzar por la ruta hallada se origina un nuevo cambio de sentido.

**Hardware.** La base del circuito impreso utilizado para el prototipo PIC es de 10 cm x 10 cm. En la parte delantera se ubicaron los dos motores Pololu con una típica configuración tracción delantera, buscando una mejor maniobrabilidad. Las llantas acopladas a estos motores fueron las llanta Pololu 42x19. En la parte trasera se ubicó la rueda libre, con esta el prototipo tiene tres apoyos a la superficie por donde se desplaza. En la parte inferior se posicionó el *driver* L293, el cual da la potencia a los motores. En la parte superior se ubicó la tarjeta del PIC 18F4550, los reguladores de voltaje y la batería. Este prototipo cuenta con tres sensores ultrasónicos, los cuales están ubicados uno en el frente del prototipo, el cual evita choques frontales. Los otros dos se ubican en cada parte lateral (izquierda y derecha) (Fig. 7).

**Alcance del prototipo.** Con el desarrollo de este prototipo se pudo tomar decisiones en cuanto a la implementación de los algoritmos que hallan la mejor ruta, evidenciando también vacíos y una redundancia de pasos

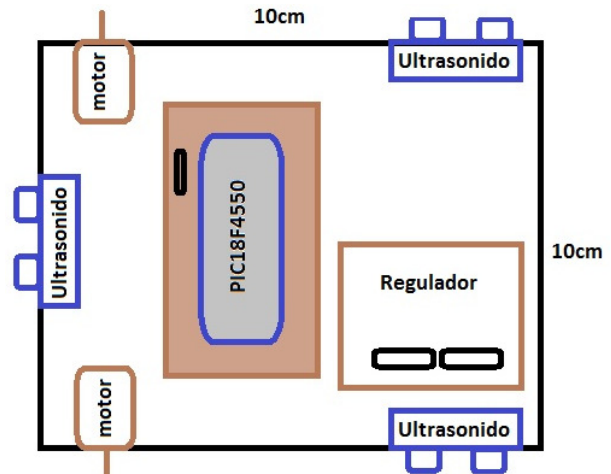


Figura 7. Distribución física de componentes en primer prototipo.

que posteriormente fueron corregidos en el prototipo final. Otro aprendizaje dado en la construcción de este primer prototipo es la necesidad de implementar los diferentes sensores de acuerdo a la altura media del prototipo, al igual que el número mínimo de sensores para lograr un óptimo desplazamiento.

### Segundo prototipo

El desarrollo del prototipo se realizó sobre la tarjeta Raspberry Pi (512 Mb, 700 Mhz, sistema operativo Linux

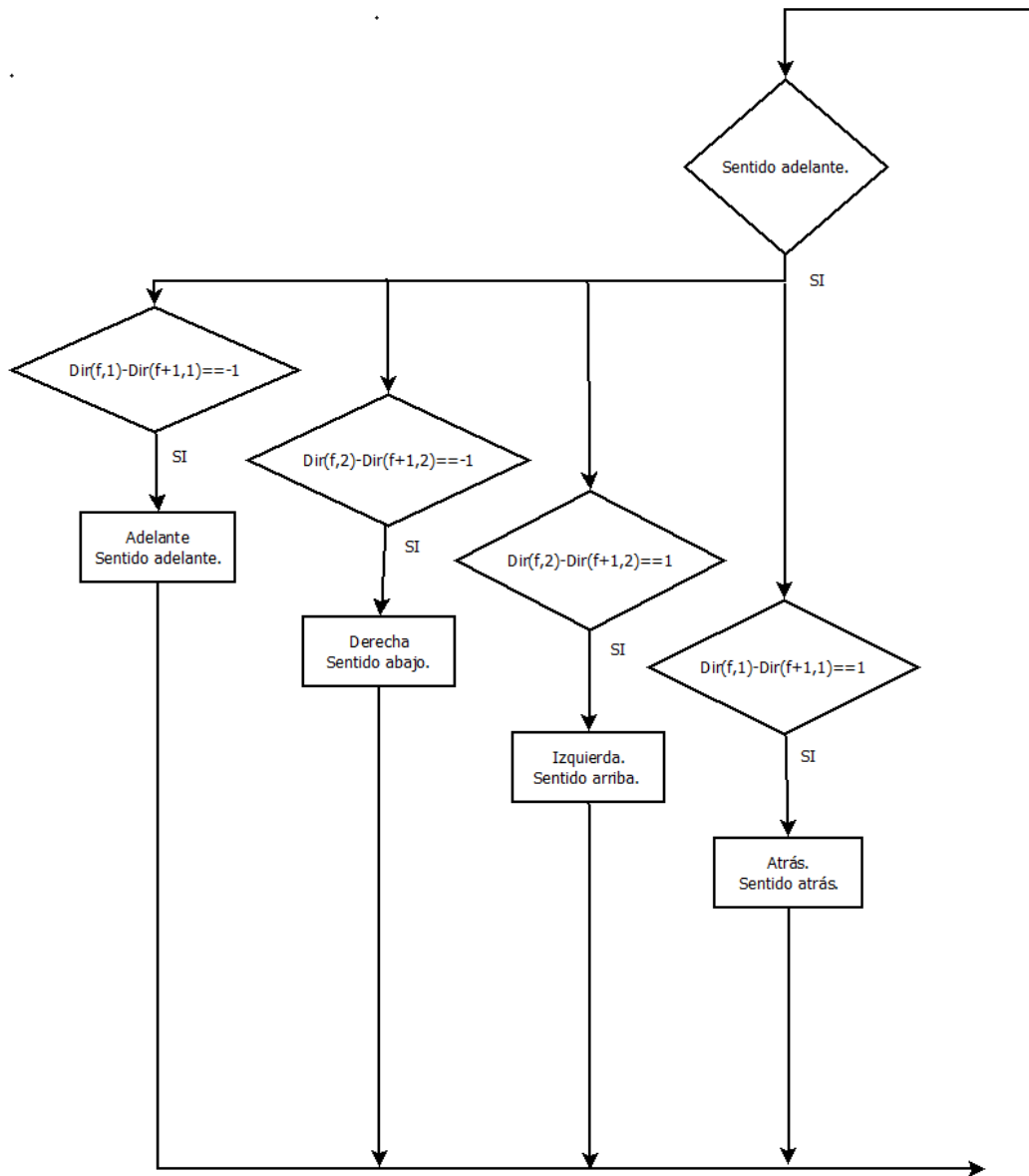


Figura 6. Flujograma proceso de desplazamiento.

Debian Jessie). Se utilizaron también una webcam genérica de 640 x 380 píxeles, sensores láser de baja potencia, ultrasonidos SH-04, y un *driver* para el láser. Los programas se desarrollaron en Python.

Dentro del desarrollo y montaje del prototipo se planteó que la tarjeta Raspberry Pi desarrollara todo el procesamiento central. Sin embargo, dentro del trabajo de implementación del sensor con la webcam, se evidenció que la captura y procesamiento de imágenes en esta plataforma es muy lenta. En promedio entre captura y la entrega de resultados se tienen retardos de 5 segundos. Si se toma este tiempo y se multiplica por las cuatro cámaras conectadas, se tiene un tiempo muy grande, algo que sería totalmente

ineficiente. Por otro lado, con este prototipo se implementó un sensor láser donde la webcam captura tres láseres encendidos con una secuencia específica. No obstante, como estas cámaras webcam tienen un plano focal reducido, se limita la medición de los láser que se ubican a los costados (Figs. 8 y 9).

**Descripción del prototipo.** En este prototipo se desarrollaron los algoritmos que entregan la medición de los ultrasonidos utilizando los pines GPIO, al igual que la secuencia que enciende los láser según la necesidad del programa principal. Igualmente en esta tarjeta se diseñó la primera versión de código de la solución de ruta en el mapa

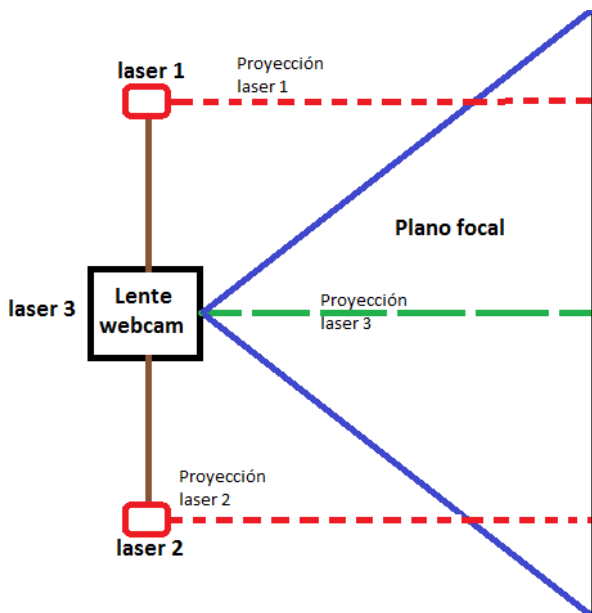


Figura 8. Esquema modelo sensor 3 de láser y una webcam.

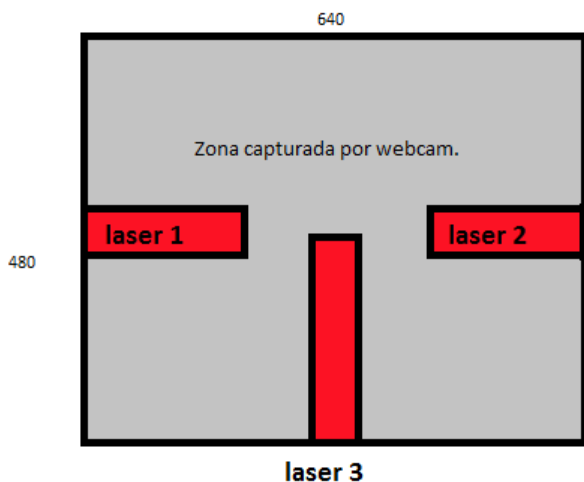


Figura 9. Recorrido probable de los 3 láser en imagen capturada.

cargado. Todo este código se programó en Python utilizando librerías *open source*.

**Alcance de prototipo.** Ya teniendo la lógica clara sobre la adquisición de la ruta, la representación de un entorno por medio de una matriz, el algoritmo de dirección para interpretar la ruta, el principio de localización por triangulación de ultrasonido, y el control básico de dos unidades motoras para desplazamiento que se evidenció con la construcción del prototipo PIC, se puede migrar esta lógica a una plataforma de desarrollo más robusta con el propósito de incluir ciertas características, en este caso la Raspberry Pi. No obstante, como ya se mencionó anteriormente,

con las repuestas dadas en velocidad y eficiencia, no es viable continuar el diseño con esta tarjeta de desarrollo. Sin embargo, si se pudieron hacer avances importante en la programación, fue por ello que se decidió no eliminar totalmente la Raspberry Pi del prototipo final, sino acoplarla a un computador que realizara los procesos de mayor costo computacional.

### Prototipo final

El desarrollo del prototipo se realizó sobre un computador portátil con procesador AMD Athon 64x, con 4 GB de RAM, corriendo un sistema operativo Linux Ubuntu 12.4. Se seleccionó también la plataforma Raspberri pi B+ con la configuración del segundo prototipo, un celular con Android, cuatro webcam, cuatro láser de baja potencia, cuatro sensores ultrasónicos, motores de alta potencia, driver dual de alta potencia, dos baterías de 12 V y 7 Ah, y un marco silla de ruedas para montar sistema de control y propulsión.

**Sensor láser.** El sensor láser diseñado para el prototipo se compone de una webcam marca Unitec con una resolución nativa de 640 x 480 píxeles, con un ángulo de apertura de lente 45 grados en su eje horizontal, y de 40 grados en su eje vertical, y un láser de 100 mw.

El proceso para hallar la distancia es el siguiente: El programa principal envía la señal a la Raspberry Pi donde por medio de los pines GPIO enciende el láser elegido. La webcam captura la imagen, donde queda plasmado el haz del láser. Cuando la imagen es capturada, el programa principal da la orden a la Raspberry Pi de apagar el láser. Luego de esto, la imagen es procesada de la siguiente forma: la imagen ya capturada es cargada como matriz, esta matriz de 640 x 480 tiene las tres componentes RGB. Como el láser es naturalmente rojo, se puede quitar las componentes verdes y azules, esto agiliza el proceso computacional, ya con la componente roja se define la zona donde se presume que el haz del láser va a quedar plasmado. Esta es del centro inferior hacia abajo como se observa en la Fig. 10.

Cuando se toma solo esta zona se elimina en gran parte las posibles lecturas erróneas que se pueden presentar por la captura de diferentes superficies luminosas o de color rojo. El algoritmo busca las zonas con mayor intensidad, esta intensidad se define en la matriz por representaciones numéricas que van desde 0 a 255. Dentro del programa se puede definir cuál es el mínimo rango que se tomará para evaluar la posición del haz, con respecto a los píxeles. Como el haz del láser ocupa más de un píxel se realiza un promedio para tener un solo dato del valor de posición, con este valor de posición y la ecu. 1.

$$D = \frac{h}{\tan(pfc \times rpc \times \rho)} \quad (1)$$

Ecuación que da la distancia del prototipo al objeto. Este sensor láser es capaz de medir distancias mínimas de 23 cm





Figura 10. Zona de desplazamiento del láser capturado.

a máximo 2.8 m. Este sensor tiene variaciones en la medida real y la medida capturada, entre mayor es la distancia del objeto mayor será el porcentaje de error (Fig. 11).

El sensor láser es construido con una webcam y un láser que se ubican de la forma mostrada en la Fig. 12.

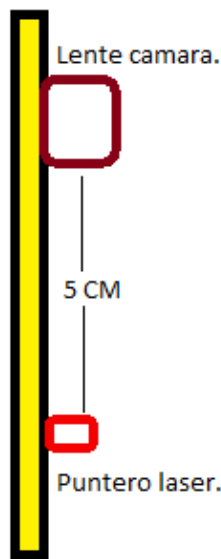


Figura 12. Distribución física entre el lente de la cámara y puntero láser.

El láser está a una distancia de cinco centímetros del lente de la cámara exactamente en la parte inferior. Esta ubicación se debe a que entre menos distancia un obstáculo esté se reflejará en los píxeles más lejanos del punto medio del plano focal (Fig. 13).

**Sensores ultrasónicos.** Los sensores ultrasónicos utilizados fueron los HC SR04, capaces de medir distancias



Figura 13. Sensor láser.

mínimas de 2 cm hasta 4 m. Estos sensores fueron creados específicamente para medir distancias, por ello son muy fáciles de implementar. No obstante hay que tener cuidado con ciertas características técnicas que entran en conflicto con la Raspberry Pi, ya que los voltajes que manejan son diferentes. El pin *echo* que entrega el sensor ultrasónico tiene niveles de 5 V, si estos voltajes son entregados directamente a los pines GPIO de la Raspberry Pi ocasionaría daños en la tarjeta. La señal *trigger* entregada por la Raspberry Pi es de 3.3 V, y aunque el fabricante recomienda 5 voltios para ser disparada, en las pruebas se observó que con el voltaje entregado es suficiente.

**Mapa.** Las características del mapa por donde se desplazará el prototipo y con en el cual se realizaron todas las pruebas de del algoritmo que halla la ruta más eficaz cuenta con las siguientes medidas: 7 m de ancho y 20 m de largo. En esta área se dibujó un plano de una ambiente real, con 12 posibles posiciones. Ya teniendo claro las barreras y obstáculos fijos, se dividió el área total generando una cuadrícula con espacios de 30 cm, que es la unidad mínima de desplazamiento del prototipo. Con estas divisiones se creó la matriz representativa del mapa. Dentro de la matriz los espacios libres fueron representados con ceros y los obstáculos con 100 (Figs. 14 y 15, y tabla 2).

**Algoritmo generador de ruta.** Este algoritmo se basó en dos métodos conocidos: Tremaux con el método pathfinding A\*. Al tener la matriz que representa el terreno, el punto de partida y el punto de llegada del prototipo, se procede a crear una matriz auxiliar donde cada espacio de la matriz se llena con un valor decimal. Este valor decimal representa que tan lejos está el punto de llegada del punto de

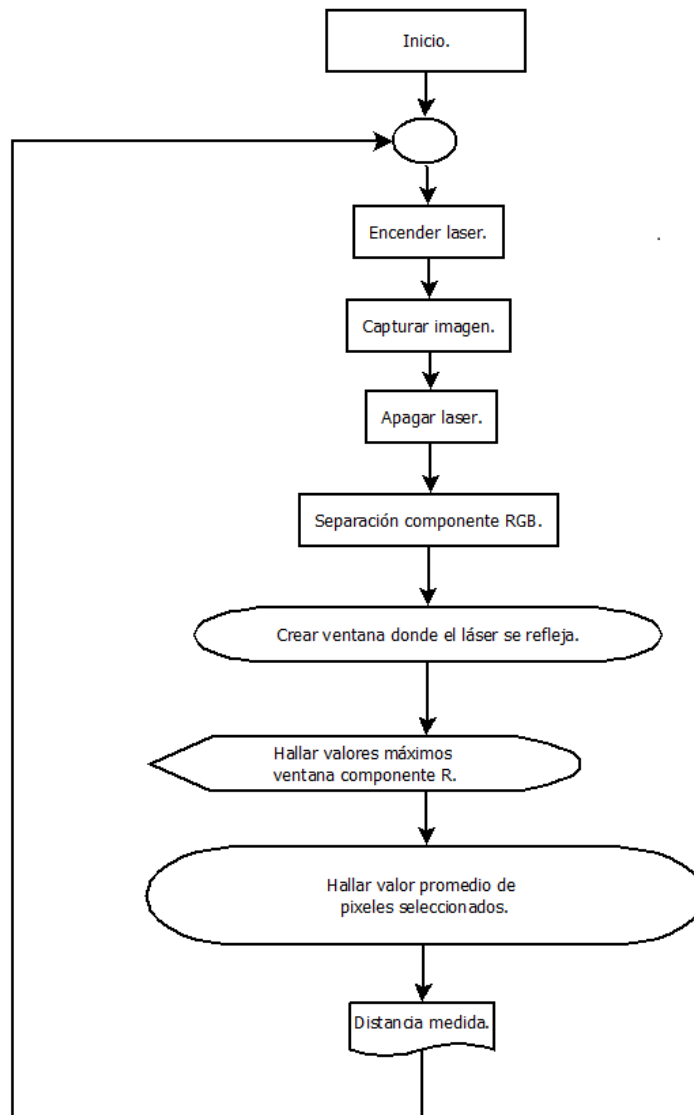


Figura 11. Algoritmo para hallar distancia con sensor laser.



Figura 14. Plano lugar de implementación del prototipo.

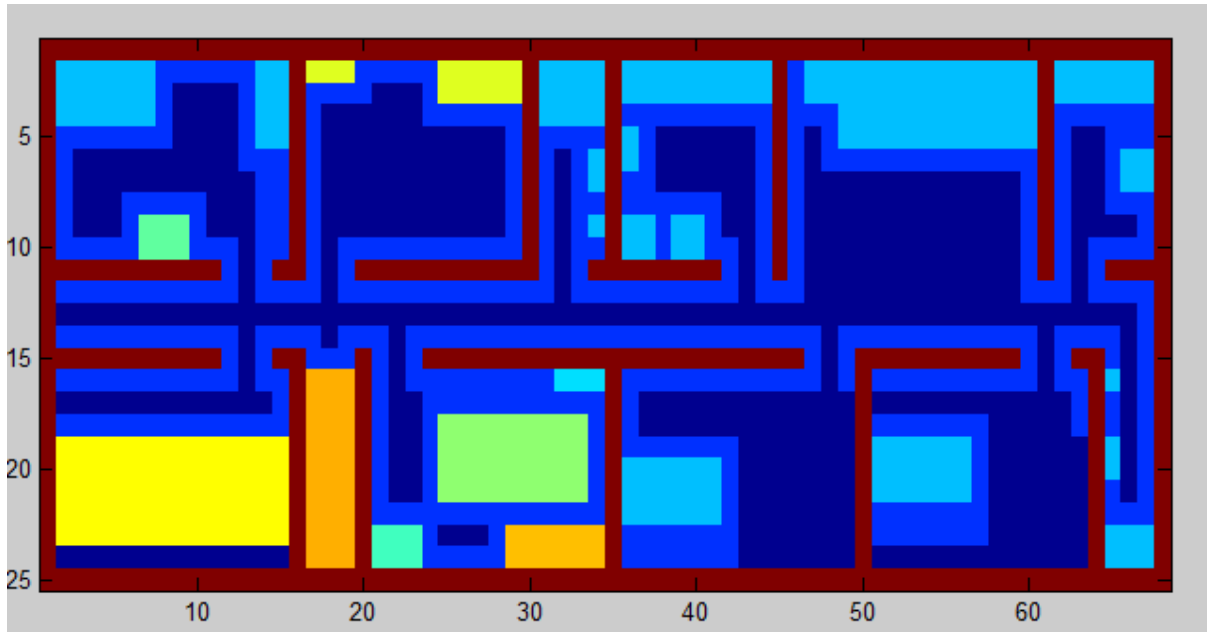


Figura 15. Representación matricial plano.

Tabla 2

Matriz de prioridad. 0 ubicación lugar de llegada.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	30
2	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	20
3	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10
4	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	20
5	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	30
6	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	40
7	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	50
8	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	60
9	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	70
10	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	80
11	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	90
12	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	100
13	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	110

inicio, siendo el punto más lejano el que obtiene el mayor valor decimal (Fig. 16 y tablas 3 y 4).

Esto ayuda a que si se tiene varias opciones de desplazamiento el algoritmo seleccione la ubicación donde está el menor valor al cual se puede desplazar, pero este desplazamiento dentro de la matriz no garantiza una ruta entre los puntos de partida y llegada. Por ello se tomó en cuenta el algoritmo de Tremaux en el cual se van marcando las posibles posiciones por donde se podría ir desplazando el prototipo. Si la ruta seleccionada no llega al punto deseado, este regresara a la última posición que cuente con otra posible opción de ruta. Si la nueva ruta marcada no llega, el algoritmo buscara todas las posibles opciones que se puedan llegar a realizar, obviamente con el apoyo de la matriz de prioridades descrita anteriormente, lo que agiliza

la consecución de la ruta. Sin embargo, este algoritmo en algunas ocasiones genera rutas no tan eficientes lo que conllevaría a gasto innecesario de desplazamiento y tiempo (Fig. 17).

**Sensores y actuadores.** El prototipo cuenta con ocho sensores que facilitan el desplazamiento durante el movimiento del modelo para evitar que se choque con obstáculos fijos y obstáculos en movimiento, estos sensores están ubicados en parejas, un sensor ultrasónico acompañado de un sensor láser (Fig. 18).

Para lograr el desplazamiento del prototipo se crearon tres posibles acciones con lo cual se garantiza el movimiento dentro del ambiente controlado. Estas tres funciones son:

- **Avance adelante:** Como inicialmente se planteó que la unidad mínima de avance fuera de 30 cm, se diseñó un

Tabla 3

Matriz representativa punto de inicio y final.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100
3	1	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.1100	0	50	0
4	1	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.1100	0	0	0
5	1	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0	0	0
6	1	0.1100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0.1100	0	300	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0.1100	0	0	0	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0
9	1	0.1100	0	0	0	0.1100	0.3000	0.3000	0.3000	0.1100	0
10	1	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.3000	0.3000	0.3000	0.1100	0.1100
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100	0.1100

Tabla 4

Matriz representativa de prioridad.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	30
2	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	20
3	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10
4	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	20
5	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	30
6	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	40
7	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	50
8	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	60
9	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	70
10	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	80
11	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	90
12	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	100
13	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	110

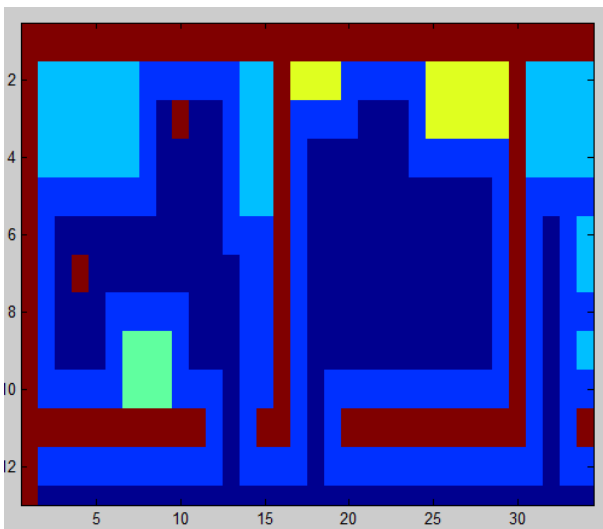


Figura 16. Representación punto de inicio y final en mapa.

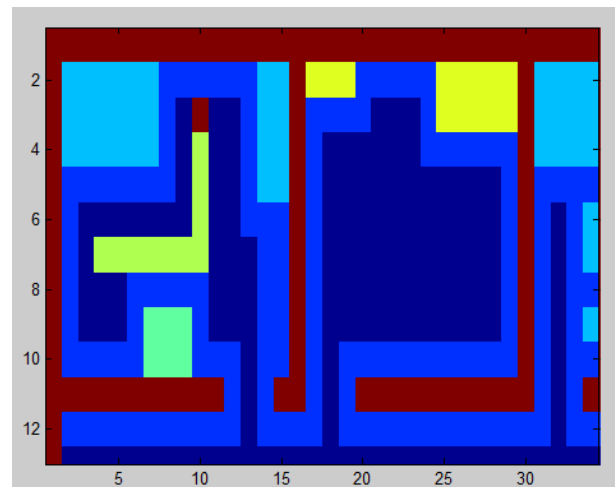


Figura 17. Ruta hallada en posiciones propuestas.

controlador para los motores que desplaza en forma recta al

prototipo, esto con la ayuda del encoder sobre cada uno de los motores.

- **Giro derecha e izquierda:** Como el prototipo es de tracción diferencial, los giros se harán sobre el propio eje.

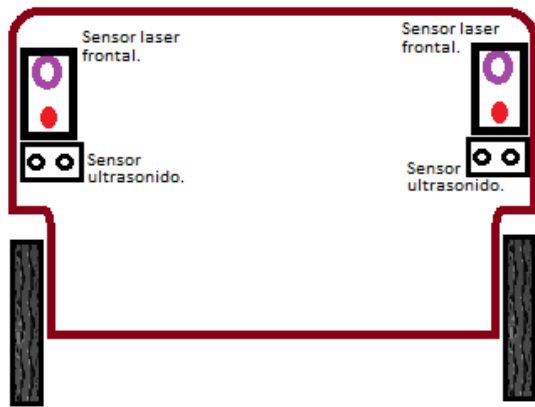


Figura 18. Vista frontal inferior de prototipo.

Una de las llantas gira en un sentido y la otra gira en sentido contrario, esto garantiza que el prototipo no pierda su referencia de ubicación.

Se planteó que el prototipo utilizara tracción diferencial, por ello se utilizaron dos motores muy comunes en el ámbito de vehículos auto propulsados con enfoque médico. Se selecciona un motor sincrónico de imán permanente accionado por una fuente de corriente continua, a 24 V - 7 A, y 10 amperios pico, con un consumo de 180 W. Este motor está acoplado a una caja de velocidades que tiene una relación 32:1 y una llanta de un metro de circunferencia, lo que entrega una velocidad máxima de 6,4 kilómetros por hora. No obstante esta velocidad máxima no será implementada en el prototipo ya que es una velocidad muy elevada para ambientes estrechos. De fábrica tiene ensamblado un freno en el eje superior del rotor el cual fue retirado, y en este lugar se acopló un encoder de 20 muescas por vuelta y un sensor infrarrojo capaz de funcionar a 100 kHz (Fig. 19).

## Resultados

Dentro del desarrollo del prototipo se realizaron dos tipos de pruebas, las simuladas y las físicas. Las simuladas se enfocan en la solución de la ruta en el mapa propuesto, estas se realizaron con el apoyo del software Matlab.

### Simulación

Dentro de las pruebas simuladas se ingresa la posición inicial y la posición final por medio del teclado. Luego del primer recorrido solo se ingresara la posición final, como ocurre en el proceso del prototipo real, ya que la posición final se convierte en posición inicial y de nuevo comienza el proceso para hallar la ruta.

Se realizó un gran número de simulaciones con el algoritmo, el ejemplo que se ilustra a continuación toma

como posición inicial, la habitación 1 y como posición final la opción 2 que corresponde al garaje. Por posición definida las coordenadas de inicio son fila 6 y columna 4, las coordenadas de posición final son fila 16 y columna 6 (Fig. 20).

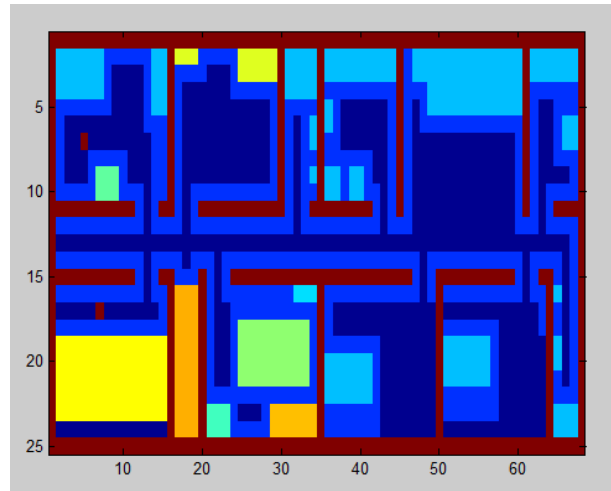


Figura 20. Representación punto de inicio punto final.

En la Fig. 20 se observa los puntos previamente establecidos de inicio y final dentro del mapa. Dentro del proceso se procede a la creación de la ruta opcional número 1, esta ruta se guarda en un vector el cual será comparado posteriormente, se observa que los desplazamientos se realizan en línea recta y con giros de 90 grados.

En este ejemplo se observa que la ruta del punto de inicio al punto final (ruta 1) como la ruta del punto final al punto de inicio (ruta 2) es idéntica, en este caso el algoritmo realiza una redundancia en este proceso. Sin embargo, en algunos casos donde la coordenada del punto de inicio es mayor a la coordenada de punto final, la ruta generada contiene mayores pasos donde el prototipo recorre lugares innecesarios.

### Pruebas reales sobre prototipo

En estas pruebas se ingresaron los datos por medio del celular y la aplicación BlueTerm. En esta aplicación se imprime los sitios a donde se puede desplazar el prototipo y solicita el punto de inicio y punto final. Sin embargo en las pruebas realizadas evidencian que la comunicación Bluetooth no se realiza de forma automática con el computador, este necesita de procedimientos externos en las dos terminales para que haya intercambio bidireccional de datos, algo que sería tedioso para el usuario final.

Cada vez que el prototipo inicia su marcha y pide información a los sensores láser, se evidencia un tiempo considerable entre la lectura de la información y la puesta en marcha de los sensores. El tiempo aumenta si el movimiento que debe realizar el prototipo son giros, ya que no solo tendrá



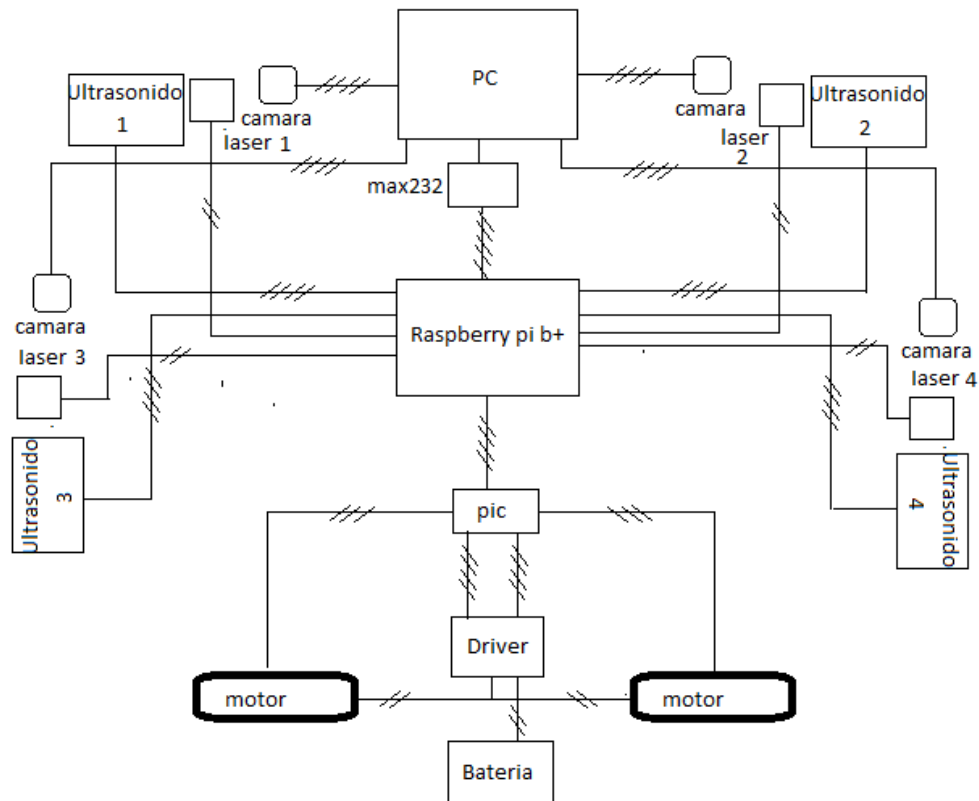


Figura 19. Conexión eléctrica del prototipo.

que sensar dos sensores láser, sino los cuatro disponibles en el prototipo.

Durante el desplazamiento se observó que al prototipo se le debe adicionar un mejor sistema de posicionamiento, ya que el utilizado (odometría) no es el más eficiente en desplazamientos por superficies donde no se controla la fricción, lo que ocasiona que las llantas no siempre se desplacen de acuerdo a lo calculado por los encoders. Si se desactivan los sensores láser y se deja la toma de datos solo a los sensores ultrasónicos el desempeño en tiempo, del robot mejora considerablemente. De hecho, si solo se utilizase sensores ultrasónicos en el prototipo el proceso computacional lo podría realizar la plataforma Raspberry Pi. La Fig. 21 muestra el prototipo final desarrollado.

### Futuros desarrollos

Ergonomía, el diseño e implementación del prototipo no tuvo en cuenta el aspecto ergonómico, esto ya que no hace parte de la ciencia en estudio. No obstante, es evidente que el prototipo para ser utilizado por una persona que cuente con limitaciones físicas severas necesita apoyos adicionales que le brinden confort.

La representación y adquisición del mapa es otro desarrollo, ya que en el prototipo creado solo se puede introducir la matriz en el programa de una manera manual,



Figura 21. Prototipo final de laboratorio.

lo que implica que muy pocos usuarios tendrán la posibilidad de ingresar sus propios mapas.

## Conclusiones

El diseño e implementación del prototipo robótico abarca muchas áreas. En este proyecto se tomaron en cuenta las más básicas como son: módulo de desplazamiento, de control, de navegación de rutas, y de sensado, principalmente. Si bien el desarrollo se centró en estos módulos, planteando soluciones finales funcionales de cada uno de ellos, se estima que como primer prototipo aun están susceptibles a muchas mejoras. Un ejemplo es la navegación y posicionamiento, como anteriormente se mencionó, la odometría utilizada aunque es muy eficiente no resulta tan eficaz en terrenos de diversa superficie, algo muy común en los ambientes propuesto de aplicación. En cuanto a los sensores, la aplicación de sensores láser se podría re-evaluar ya que por costos serían inviábiles, y aunque la elaboración de los mismos con webcam ahorra mucho dinero, estos son muy susceptibles a variables propias del ambiente como luces, reflejo de color rojo en el área de plano focal determinada, entre otros. Un remplazo eficiente podría llegar a ser un sensor ultravioleta de medida de propósito general, los cuales se encuentran fácilmente en el mercado a un precio razonable.

El prototipo brinda un aporte y soluciona una necesidad de una población específica. Esta herramienta tecnológica permitirá una mayor grado de independencia para personas con dificultades de movilidad. El proyecto se puede implementar de forma masiva, ya que es técnicamente y económicamente viable.

## Referencias

Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., y Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica*. McGraw Hill.

- Challagundla, M., Yogeshwar, K., y Harsha, N. (2014). Automatic motion control of powered wheel chair by the movements of eye blink. En *International conference on advanced communication control and computing technologies (icaccct 2014)* (p. 1-6).
- Crawley, P. (2012). *The brains behind the electric wheelchair, one of canada's 'great artifacts'*. On line. Descargado de <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/small-business/sb-managing/the-brains-behind-the-electric-wheelchair/article4502631/>
- Florczyk, S. (2005). *Robot vision: Video-based indoor exploration with autonomous and mobile robots*. Wiley-Vch Verlag.
- García, E. (2012). *Visión artificial*. FUOC Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya.
- Ollero, A. (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles*. Marcombo Boixareu Editores.
- OMS, y BM. (2011). *Informe mundial sobre la discapacidad*. On line. (Organización Mundial de la Salud y el Grupo del Banco Mundial)
- Pololu, P. (2008). *Datasheet ultrasonic distance sensor*. On line. (Parallax Inc.)
- Rasbridge, J. (2016). *The power chair: A history*. On line. Descargado de <http://www.powerchairsdirect.co.uk/powerchair%20articles/powerchair-history.html>
- Reddy, S., Bhatia, D., y Venkateswara, B. (2016). Design of low-cost manual cum electric-powered wheelchair for disabled person's to use in indoor. En *2nd international conference on next generation computing technologies (ngct 2016)* (p. 1-6).



# Instrucciones para los autores

## Tekhnê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Revista Tekhnê

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad Tecnológica

### Alcance y política editorial de la revista

La revista *Tekhnê* es una revista institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Es arbitrada, y acepta trabajos originales en el campo de la ingeniería, la tecnología y las ciencias aplicadas, con la condición de que sean producto de trabajos de investigación. Desde su primer número en el año 2003, la revista ha mantenido su regularidad.

Posee un carácter científico-académico, y atiende a la comunidad nacional e internacional especialista en áreas de ingenierías eléctrica, electrónica, mecánica, de sistemas, industrial y civil. Publica resultados de investigación en español o inglés (artículos originales e inéditos), y está completamente abierta a especialistas de todo el mundo en calidad de autores y/o lectores. Es arbitrada mediante un proceso doble ciego, con rotación continua de árbitros.

La revista *Tekhnê* posee una periodicidad semestral, coincidente con los semestres académicos de la Universidad Distrital. La publicación se realiza los meses de junio y diciembre de cada año. El proceso de evaluación de los trabajos sometidos para la publicación contempla una etapa de aceptación inicial por parte del Comité Editorial, quien verifica el cumplimiento de los parámetros editoriales, y una evaluación por pares académicos mediante un proceso doble ciego. El tiempo que toma decidir sobre la aceptación de un trabajo nunca supera los seis (6) meses a partir de la fecha de recepción.

La revista *Tekhnê* está comprometida con altos estándares de ética y toma las medidas posibles para evitar las malas prácticas como el fraude y el plagio. Todos los autores deben declarar que sus manuscritos son originales, inéditos y de su autoría, condición necesaria para ser considerados por el Comité Editorial. La revista *Tekhnê* también se compromete a garantizar una justa, objetiva y rápida revisión de los manuscritos tanto por árbitros como por parte del Editor. Los autores reconocen que han dado a conocer cualquier conflicto real o potencial de intereses con su trabajo o de beneficios parciales asociados a través de la cesión de derechos.

La revista *Tekhnê* es financiada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, razón por la cual NO cobra por procesamiento y/o publicación de artículos (APCs).

### Tipos de artículos aceptados

La revista publica exclusivamente artículos de Investigación Científica y Tecnológica (según clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas Publindex de Colombia), los cuales se caracterizan por presentar resultados originales de proyectos terminados de investigación, con secciones claramente diferenciadas de introducción, metodología, resultados y conclusiones. Otro tipo de artículos como los denominados de reflexión, revisión, artículos cortos o reportes de casos no son aceptados, y serán rechazados por el Comité Editorial sin surtir proceso alguno de evaluación.

### Formato del manuscrito

En cuanto a estructura, deben ser evidentes las secciones de introducción, metodología, resultados, conclusiones y referencias. El resto del documento se debe conformar en concordancia con su contenido. La longitud no debe superar las 25 páginas en su totalidad. En la parte inicial de la primera página se debe incluir: (1) Un título del manuscrito (en español e inglés), corto, descriptivo del contenido y atractivo para el lector. (2) Nombre completo de los autores y detalles de afiliación institucional, incluido correo electrónico. (3) Resumen (en español e inglés) del manuscrito con un tamaño máximo de 250 palabras, que establezca el objetivo, la metodología, los resultados y principales conclusiones. (4) Palabras claves, máximo cinco, en minúsculas y separadas por comas.

En cuanto al formato de documento solicitado a los autores, se pide no utilizar estilos de los procesadores de textos. El manuscrito debe estar a una columna, a espacio sencillo entre líneas de texto y sin dejar espacio entre párrafos y entre títulos y texto. Se debe seleccionar papel tamaño carta (21 cm de ancho por 29.7 cm de largo), en forma vertical. Los márgenes deben ser 2 cm en todos los lados (izquierda, derecha, arriba y abajo). Se debe usar letra Times New Roman (si no se posee, utilizar una de tipo serif similar) sin reducción de espacio entre caracteres, con tamaño de 12 puntos. Por ningún motivo se aceptarán trabajos que incluyan letras, palabras o símbolos manuscritos en el texto. Las tablas y figuras deben ser claras y nítidas, insertadas (no pegadas) en el documento como un único objeto (no agrupación de varios) con la mayor calidad posible. Se pide que estas figuras sean remitidas en un archivo comprimido por separado. Si se usan líneas o figuras en colores, no se debe usar colores claros (amarillos, celestes y similares). El Editor se reserva el derecho de eliminar toda figura o tabla que no cumpla las normas. Toda figura, tabla, ecuación o referencia incluida en el manuscrito debe estar referenciada/citada en el cuerpo del documento. No se debe usar sangría en ninguna sección del artículo. Las referencias deben manejar correcto estilo APA sexta edición. No se deben utilizar notas al pie de página, y usar máximo tres niveles para los títulos. Se puede incluir una sección de Agradecimientos (altamente recomendada), redactada en forma sobria, de no más de cuatro líneas justo después de las Conclusiones.

En cuanto al formato del archivo fuente, se puede utilizar cualquier procesador de textos, siempre y cuando el contenido sea completo y editable (no se permite archivos \*.txt). Los formatos recomendados son: \*.rtf, \*.doc, \*.docx, \*.odt, \*.wpd y \*.tex. En caso de utilizar  $\LaTeX$ , se deben remitir todos los archivos fuente. Para todos los casos, los autores deben remitir, junto con las imágenes, un archivo BibTeX (un único archivo \*.bib) con todas las referencias utilizadas en el artículo, cada referencia con una *key* única. Este archivo puede ser generado desde manejadores de referencias como Mendeley y Zotero, o generado con herramientas como JabRef.

En cuanto al lenguaje y estilo de redacción, se deben utilizar oraciones simples y evitar regionalismos. Se debe poner especial cuidado en el correcto uso de la ortografía y redacción, de acuerdo a Normas de la Real Academia Española ([www.rae.es](http://www.rae.es)).



---

## Formato de publicación

Los manuscritos son publicados siguiendo el estilo APA sexta edición. Esto es realizado en la diagramación, y es transparente para los autores.

## Cambios en la edición

El Editor se reserva el derecho, y así lo acepta el(la)(los) autor(a)(es) con el sólo envío del manuscrito, de realizar modificaciones con el objeto de lograr una mejor presentación e impacto del trabajo. Estas modificaciones pueden incluir cambios en el título, resumen, palabras clave, figuras, tablas y texto, entre otros, cambios que no afectan, según el Editor, la esencia del trabajo enviado por los autores. En particular, figuras que no pueden ser bien reproducidas pueden ser eliminadas por el Editor. Las referencias incompletas serán también eliminadas por exigencias de las bases de datos.

## Envío de manuscritos

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System (<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>) en formato digital, adjuntando:

- La carta de presentación.
- La carta de cesión de derechos (según formato).

La carta de presentación debe estar dirigida al director y editor de la revista, Ing. Fredy H. Martínez S., y debe incluir:

- Solicitud expresa de considerar el artículo para publicarlo en la revista *Tekhnê*.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores, con detalle de entidad a la que se encuentran vinculados, dirección e-mail institucional, títulos académicos, ciudad y país.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del artículo.
- Exclusividad de su remisión a la revista *Tekhnê*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.
- Institución que financió o avaló el proyecto.

El proceso de envío consta de tres etapas:

1. Envío del artículo en formato PDF. Se carga al OJS un único archivo sin comprimir.
2. Registro de los datos. Se registra en el OJS los datos básicos de los autores y del artículo.
3. Envío de Archivos Complementarios. Todos los archivos complementarios se envían en un único archivo comprimido. Estos archivos complementarios incluyen: los archivos fuente del documento, tanto texto como imágenes en alta calidad, archivo BibTeX con todas las referencias utilizadas, la carta de presentación, y la carta de cesión de derechos.

## Proceso de publicación

El proceso que sigue la revista para la evaluación y publicación de trabajos es el siguiente:

- Recepción del manuscrito (primera versión, convocatoria permanente)
- Verificación de normas por parte de auxiliar de la revista
- Notificación a autores de recepción, solicitud de ajustes de forma y de diligenciamiento de formato de datos de autores
- Recepción de manuscrito (segunda versión) y formato de datos de autores
- Revisión por parte del Comité Editorial
- Notificación a autores de si el manuscrito entra o no a evaluación por parte de pares
- Envío de manuscrito a pares seleccionados
- Recepción de evaluación de pares
- Notificación de evaluación a autores, y solicitud de correcciones si son pertinentes
- Recepción de manuscrito (tercera versión)
- Estudio de manuscrito corregido por parte del Comité Editorial
- Notificación a autores de decisión final de publicación y solicitud de carta de cesión de derechos
- Recepción de carta de cesión de derechos
- Corrección de estilo y diagramación del manuscrito
- Envío de versión final a autores para verificación de errores y aprobación final
- Publicación del artículo
- Notificación a autores de publicación
- Entrega de ejemplares a autores

## Contacto

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse con:

**Prof. Fredy H. Martínez S.**

Editor y director revista Tekhnê

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 301

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A-35 sur

Teléfono: (571) 3238400 Ext. 5003

Celular: (57) 3005585481

Bogotá D.C., Colombia

E-Mail: [tekhneud@udistrital.edu.co](mailto:tekhneud@udistrital.edu.co)

Url: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>

---

# Instructions for authors

## T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Tekhnê journal  
District University Francisco José de Caldas  
Technological Faculty

### Outreach and publishing policy journal

The *Tekhnê* journal is an institutional journal of the Technological Faculty of District University Francisco José de Caldas (Colombia). It is arbitrated, and accepts original articles in the field of engineering, technology and applied sciences on the condition that they are the product of research work. Since its first issue in 2003 the journal has maintained its regularity.

It has a scientific-academic nature and attends the specialist national and international community in the areas of electrical, electronics, mechanical, systems, industrial and civil engineering. Publishes research results in Spanish or English (original and unpublished articles), and is fully open to experts from around the world as authors and/or readers. It is arbitrated by a double-blind process, with continuous rotation of evaluators.

The *Tekhnê* journal has twice a year periodicity, coinciding with the academic semesters of the District University. The publication is made in June and December each year. The evaluation process of the papers submitted for publication includes a stage of initial acceptance by the Editorial Committee, which verifies compliance with the editorial parameters and an evaluation by academic peers through a double blind process. The time taken to decide on the acceptance of a paper never exceeds six (6) months from the date of receipt.

The *Tekhnê* journal is committed to high ethical standards and take possible measures to avoid bad practices such as fraud and plagiarism. All authors must declare that their manuscripts are original, unpublished and of his own, needed condition to be considered by the Editorial Committee. The *Tekhnê* journal also is committed to ensuring a fair, objective and quick review of manuscripts both referees as by the Editor. The authors recognize that they have disclosed any actual or potential conflict of interest with their work or partial benefits associated through the transfer of rights.

The *Tekhnê* journal is funded by the District University Francisco José de Caldas, which is why it does NOT charge for processing and/or publishing articles (APCs).

### Types of articles accepted

The journal publishes only Scientific and Technological Research articles (as classified by Publindex, the National Abstracting and

Indexing System for Serial Publications in Science, Technology and Innovation of Colciencias), which are characterized by original results of completed research projects with clearly distinct sections of introduction, methodology, results and conclusions. Other articles as called reflection, review, short articles or case reports are not accepted and will be rejected by the Editorial Committee without dispensing any evaluation process.

### Manuscript format

Regarding the structure, should be evident the sections of introduction, methodology, results, conclusions and references. The rest of the document must conform in accordance with its contents. The length should not exceed 25 pages in full. In the initial part of the first page should include: (1) A manuscript title (in Spanish and English), short, descriptive of the content and attractive to the reader. (2) Full name of the authors and institutional affiliation details, including email. (3) Abstract (in Spanish and English) of the manuscript with a maximum size of 250 words, which set the objective, methodology, results and major conclusions. (4) Keywords, up to five, lowercase and separated by commas.

Regarding the document format requested, authors are asked not to use styles of word processors. The manuscript must be on a column, single space between lines of text without space between paragraphs and between titles and text. Must be selected letter size paper (21 cm wide by 29.7 cm long) vertically. Margins should be 2 cm on all sides (left, right, up and down). Must be used Times New Roman (if the font is not available, use a similar serif type) without reducing character spacing, of 12 points. No articles including letters, words or symbols handwritten in the text will be accepted. Tables and figures should be clear, inserted (not pasted) in the document as a single object (no grouping of several) with the highest possible quality. It is requested that these figures are sent in a separate zipped file. If lines or color figures are used, you should not to use light colors (yellow, light blue...). The Editor reserves the right to remove any figure or table that does not meet the standards. Every figure, table, equation or references in the manuscript should be referenced/cited in the document body. Should not be indented any section of the article. References should handle right APA format 6th Edition. Do not use footnotes, and maximum to use three levels for titles. You can include an Acknowledgments section (highly recommended), written soberly, of no more than four lines, right after the Conclusions.

Regarding the source file format, you can use any word processor, as long as the content is complete and editable (\*.txt files are not allowed). Recommended formats are: \*.rtf, \*.doc, \*.docx, \*.odt, \*.wpd y \*.tex. When using L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, the author must submit all source files. In all cases, the authors must submit, along with the images, a BibTeX file (a single \*.bib file) with all references used, each reference with a single key. This file can be generated from reference managers like Mendeley and Zotero, or generated with tools such as JabRef.

Regarding the language and style of writing, the author must use simple sentences and avoid regionalisms. He must take special care to use the correct spelling and writing, according to the rules of language.

### Publication format

The manuscripts are published following the APA style 6th edition. This is done in the layout, and is transparent to the authors.

### Editing changes

The Editor reserves the right, and is accepted by the author(s) with the only article shipping, to make changes in order to achieve

---

ve a better presentation and impact of the work. These modifications may include changes in the title, abstract, keywords, figures, tables and text, among others, changes that do not affect, according to the Editor, the essence of the work submitted by the authors. In particular, figures that can not be well reproduced can be eliminated by the Editor. Incomplete references will also be eliminated by demands of databases.

### Sending manuscripts

Authors must submit their articles through the application for the purpose of the Open Journal System (<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>) in digital format, attaching:

- The presentation letter.
- The transfer of rights letter (according to format).

The presentation letter should be addressed to the director and editor of the journal Eng. Fredy H. Martínez S., and it should include:

- Express request to consider the article for publication in *Tekhnê* journal.
- Full title of the article.
- Full names of all authors, detailing entity linked, institutional e-mail address, academic degrees, city and country.
- Certification of the originality and novelty of the article.
- Exclusivity of submission to *Tekhnê* journal.
- Confirmation of authorship with the signature of all authors.
- Institution financing the project.

The submission process consists of three stages:

1. Sending the article in PDF format. OJS is charged with a single uncompressed file.
2. Data recording. the basic data of the authors and article are registered in the OJS.
3. Complementary files. All additional files are sent in a single compressed file. These complementary files include: the source of the document, both text and images in high quality, BibTeX file with all references used, the presentation letter, and the transfer of rights letter.

### Publishing process

The process followed by the journal for evaluation and publication of articles is as follows:

- Receipt of the manuscript (first version, continuously open call)
- Verification of standards by the assistant of the journal
- Notification to authors of receipt, request for the form adjustments and filling of authors data format
- Receipt of the manuscript (second version) and authors data format
- Review by the Editorial Committee
- Notification to authors if the manuscript is sent or not to evaluation by peers
- Sending the manuscript to selected peers
- Reception peer evaluation
- Notification of evaluation to authors, and request corrections if they are relevant
- Receipt of the manuscript (third version)
- Study of manuscript corrected by the Editorial Committee
- Notification to authors of publication and final decision, and request the rights transfer letter
- Reception of the rights transfer letter
- Style correction and layout of the manuscript
- Send final version to authors for error checking and final approval
- Publication of the article
- Notification to authors of the publication
- Delivery of copies to authors

### Contact

For any request for additional information please contact:

**Prof. Fredy H. Martínez S.**  
Editor and director Tekhnê journal  
Journals Room, Block 5, Office 301  
Technological Faculty  
District University Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A-35 sur  
Phone: (571) 3238400 Ext. 5003  
Cell phone: (57) 3005585481  
Bogotá D.C., Colombia  
E-Mail: [tekhneud@udistrital.edu.co](mailto:tekhneud@udistrital.edu.co)

Url: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index>