

---

# 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. 12 No. 1  
Enero - Junio de 2015  
ISSN 1692-8407

# Tekhnê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volumen 12 - Número 1 - 2015

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 Fernando González Casas  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D(c) Hermes Javier Eslava Blanco  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Wilson Infante Moreno  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

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

M.Sc(c) Mariela Castiblanco Ortiz  
Universidad Distrital 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(c) César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (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

Luisa Fernanda Castañeda Farieta

**Cubierta:** Facultad Tecnológica Universidad Distrital (Sierra  
Morena), Bogotá D.C. (Colombia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

**Contracubierta:** Coliseo Facultad Tecnológica (bienvenida es-  
tudiantes nuevos), Bogotá D.C. (Colombia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

## Corrección de estilo español

Luisa Fernanda Castañeda Farieta

## 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>

# Tekhnê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volume 12 - Number 1 - 2015

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 Torralvo  
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 Fernando González Casas  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D(c) Hermes Javier Eslava Blanco  
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Wilson Infante Moreno  
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(c) 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

Luisa Fernanda Castañeda Farieta

**Cover picture:** Technological Faculty, District University (Sierra Morena), Bogotá D.C. (Colombia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

**Back cover picture:** Technological Faculty Coliseum (welcoming new students), Bogotá D.C. (Colombia)

**Autor:** Fredy H. Martínez S.

## Style correction in spanish

Luisa Fernanda Castañeda Farieta

## 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.

### **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  
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>

# 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 12 - Número 1 - 2015  
ISSN 1692-8407

<b>6.</b>	<b>Prototipo de control y monitoreo para parqueaderos vehiculares</b> <i>Carlos Iván Cordoba</i> <i>Brayan Steven Plazas</i>	<b>67</b>
<b>V</b>	<b>Instrucciones para los autores</b>	<b>73</b>
<b>VI</b>	<b>Instructions for authors</b>	<b>75</b>

## 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>
<b>1.</b>	<b>Sistema de procesamiento de imágenes vasculares infrarrojas para aplicación en dispositivos biométricos de control de acceso</b> <i>Cristhian L. Cortes</i> <i>Juan S. Leguizamón</i> <i>Edwar Jacinto Gómez</i>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>Prototipo de máquina fresadora CNC para circuitos impresos</b> <i>Diego A. Alonso S.</i> <i>John E. Gil D.</i> <i>Fredy H. Martínez S.</i>	<b>23</b>
<b>3.</b>	<b>Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales</b> <i>Fredy D. Duitama R.</i> <i>Laura M. Moreno S.</i> <i>Eduardo Zamudio H.</i>	<b>39</b>
<b>4.</b>	<b>Implementación de un aerogenerador de 200 W para la iluminación de un apartamento unifamiliar localizado en la localidad de Usme en Bogotá</b> <i>Cristian A. Granados</i> <i>Edgar E. Londoño M.</i>	<b>49</b>
<b>5.</b>	<b>Actuadores inteligentes con protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y medio físico RS-485</b> <i>Erika Pimentel O.</i> <i>Yeferson Yate M.</i> <i>Jorge E. Porras B.</i>	<b>59</b>

---

# Editorial

**H**OY, luego de veinte años de funcionamiento, la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se ha convertido en un referente para muchas otras universidades a nivel nacional en lo que respecta a educación superior por ciclos propedéuticos. Es un motivo de orgullo para la Universidad, la cual celebra este cumpleaños con el apoyo y entusiasmo de toda su comunidad.

El 20 de febrero de 1995, y con el ánimo de solucionar problemas puntuales de acceso a la educación del Distrito Capital en la zona de Ciudad Bolívar, y en medio de fuertes presiones políticas, nace la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En sus inicios solo se ofrecían tres (3) programas académicos de nivel tecnológico: los programas de Tecnología Industrial, Tecnología Mecánica y Tecnología Eléctrica. Estos programas fueron ofrecidos en principio en convenio con la Universidad Tecnológica de Pereira, y las Unidades Tecnológicas de Santander. Un año más adelante entrarían en funcionamiento los programas de Tecnología en Sistematización de Datos y Tecnología en Construcciones Civiles. Muy pronto la Facultad apropió estos programas, adaptándolos a las necesidades particulares del Distrito Capital, y hoy son referentes para el diseño de programas a nivel nacional.

La Facultad Tecnológica ha crecido exponencialmente, no solo en cuanto a población estudiantil (más de 7 mil estudiantes activos, y proyecta recibir unos 3 mil más en los siguientes tres años en la nueva sede de 'El Ensueño'), sino también en capacidad (instalaciones y docentes) y programas académicos, en particular con los ciclos de ingeniería. La Facultad Tecnológica es una de las Facultades con mayor oferta en programas del área de ingeniería, y posee indicadores sobresalientes, como el de ocupación laboral de sus egresados en el campo de formación. Los programas de ingeniería por ciclos estructurados alrededor de los tecnológicos son: Ingeniería Eléctrica, Ingeniería en Control, Ingeniería en Telecomunicaciones, Ingeniería Civil, Ingeniería de Producción, Ingeniería en Telemática e Ingeniería Mecánica. Ya su comunidad de docentes posee una masa crítica formada y preparada para el ofrecimiento de programas a nivel de maestría, sin dejar de lado fortalezas como la investigación y la extensión. Sin lugar a duda la Facultad Tecnológica seguirá realizando grandes aportes a la ciudad y al país.

En este nuevo número de la revista deseamos agradecer a los árbitros por su excelente y oportuno trabajo evaluando los manuscritos postulados para publicación, y a la decanatura de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital por su apoyo en la edición y publicación de este nuevo ejemplar. Además, agradecemos a la Editorial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el acompañamiento brindado.

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

---

# Editorial

**T**ODAY, after twenty years of operation, the Technological Faculty of the District University Francisco José de Caldas has become a point of reference for many other universities nationwide with regard to propaedeutic cycles for higher education. It is a matter of pride for the University, which is celebrating this birthday with the support and enthusiasm of the whole community.

On February 20, 1995, and with the aim of solving specific problems of access to education of the Capital District in Ciudad Bolívar area, and among strong political pressure, the Technological Faculty of the District University Francisco José de Caldas born. In its beginnings the Faculty offers only three (3) technological level academic programs: Industrial Technology, Mechanical Technology and Electrical Technology. These programs were offered initially in partnership with the Technological University of Pereira, and the Technological Units of Santander. A year later came into operation the programs of Data Systematization Technology and Technology in Civil Construction. Pretty soon the Faculty appropriated these programs, adapted them to the particular needs of the Capital District, and they are today reference to design programs nationwide.

The Technological Faculty has grown exponentially, not only in terms of student population (more than 7,000 active students, and expects to receive about 3,000 more in the next three years in the new headquarters of 'El Ensueño'), but also in capacity (facilities and teachers) and academic programs, particularly with the engineering cycles. The Technological Faculty is one of the faculties with more programs offer in the engineering area, and has outstanding indicators such as labor employment of its graduates in the field of training. Engineering programs structured around technological cycles are: Electrical Engineering, Control Engineering, Telecommunications Engineering, Civil Engineering, Production Engineering, Telematics Engineering and Mechanical Engineering. Teachers and community has a critical mass formed and prepared for offering master's level programs, without neglecting strengths as research and extension. Undoubtedly the Technological Faculty will continue to make great contributions to the city and the country.

In this new issue of the journal we want to thank the evaluators for their excellent and timely work evaluating manuscripts submitted for publication, and the deanship of the Technological Faculty of the District University for their support in editing and publication of this new issue. In addition, we thank the Editorial of the District University Francisco José de Caldas for the support provided.

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

# Sistema de procesamiento de imágenes vasculares infrarrojas para aplicación en dispositivos biométricos de control de acceso

*Vascular imaging infrared system for application in biometric devices of access control*

Cristhian L. Cortes

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

Juan S. Leguizamon

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

Edwar Jacinto Gómez

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

---

En este proyecto, se utilizó la propiedad del infrarrojo cercano, producto de la reacción de la sangre al entrar en contacto con cierta longitud de onda, para obtener una captura preliminar del mapa vascular del dorso de la mano derecha que pueda manipularse a través de un algoritmo diseñado en el software MATLAB y generar, de este modo, un dispositivo capaz de realizar el preprocesamiento de una imagen tomada desde una cámara de baja resolución. Al implementar el sistema, se logró la extracción de las características del mapa circulatorio en el área delimitada (ROI), únicas para cada usuario, aplicables a dispositivos biométricos de control de acceso.

*Palabras clave:* Análisis de imagen, preprocesamiento de datos, técnicas de sustracción

In this project, was used the property of near-infrared, the reaction product of the blood to come into contact with certain wavelength, to obtain a preliminary snapshot of the vascular map on the back of the right hand that can be handled through an algorithm designed in MATLAB software and generate, in this way, a device capable of performing preprocessing of an image taken from a low resolution camera. By implementing the system, was managed the extraction of characteristics of circulatory map in the delimited area (ROI), unique for each user, applicable to biometric devices of access control.

*Keywords:* Data preprocessing, image analysis, subtraction techniques

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Cortes, C., Leguizamon, J. y Jacinto, E. (2015). *Sistema de procesamiento de imágenes vasculares infrarrojas para aplicación en dispositivos biométricos de control de acceso*. Revista Tekhné, 12(1), 13-22.

## Introducción

Con el crecimiento sin precedentes de las tecnologías de la información (TIC) al igual que los delitos informáticos, se ha hecho necesario asegurar que el acceso a cierto tipo de información y a algunos espacios físicos de la industria se limite a un grupo especializado de personas de confiabilidad. Inicialmente, en algunas entidades se implementó una solución parcial contratando compañías y personal experto en seguridad, pero hoy se hace vital automatizar este proceso para así garantizar que la alteración o hurto de identidades tienda a ser nula. En algunas industrias y sectores se ha optado por usar software innovadores en el área de la seguridad pero, debido a su vital importancia en el sector biométrico, se han elevado los costos de aplicación a sistemas cerrados.

Algunas personas, o sociedades, se han dedicado a estudiar los elementos de seguridad para lograr falsificarlos y utilizarlos para beneficio personal. De acuerdo con la *Federal Trade Commission*, entre 1999 y 2003, 27,3 millones de americanos fueron víctimas de robos de identidad, en tanto que negocios e instituciones financieras perdieron cerca de \$48 billones de dólares a manos de ladrones de identidad y, por su parte, las víctimas también incurrieron en gastos de su bolsillo por el orden de los \$5 billones por el mismo motivo (FTC, 2003).

Por esto, se hace necesaria la implementación de sistemas capaces de garantizar la restricción de acceso para personal ajeno a cierta información o espacios donde se detalle el funcionamiento en general de procesos de producción, de finanzas, de control de gestión, de comercio o cualquiera que esté ligado al crecimiento de las entidades.

En Colombia, se ha observado que el fraude dentro de la industria es, en gran parte de los casos, perpetrado por personal activo de las empresas (Kroll, 2012). El introducir tecnologías basadas en rasgos intrínsecos de un usuario permitirá no solo la reducción de estos delitos, sino la creación de nuevas líneas de investigación enfocadas en la aplicación de los diferentes patrones corporales a métodos de reconocimiento existentes.

Para entender el trasfondo de esta investigación, es necesario considerar el por qué del incremento exponencial del uso de sistemas biométricos en la cotidianidad tal como lo expone el grupo ATENEA (Grupo ATENEA, 2011) en un informe realizado sobre defensa y seguridad donde se destacan como conclusiones:

- El uso de sistemas biométricos permite tener un nivel de seguridad superior respecto a otros sistemas.
- Este tipo de sistemas se pueden implementar con facilidad y actualmente se encuentra en continua investigación.
- El uso, cada vez mayor, de estos sistemas incrementa la demanda por parte de instituciones dedicadas a la seguridad.

Las características vitales de tipo físico de un usuario, presentan ciertas características que garantizan la singularidad del dato para, de este modo, lograr una identificación exacta y exclusiva; para obtener este resultado, con la más baja tasa de error, el sistema biométrico debe cumplir con ciertos factores que describen Sanz (Sanz, 2009) y Suárez (Suárez, 2011) en sus investigaciones así:

- Universalidad.
- Unicidad.
- Estabilidad.
- Rendimiento.
- Mensurabilidad.
- Elusión.

## Fundamentos aplicables a sistemas biométricos

Tomando como referencia el trabajo realizado por Aguilar (Aguilar, Sánchez, Toscano, Nakano, y Pérez, 2008), las etapas claves para lograr un sistema biométrico óptimo son:

1. *Etapas de adquisición*: La adquisición cobra una vital importancia para el funcionamiento de cualquier sistema biométrico ya que, a partir de la captura de una imagen de cualquiera de los rasgos físicos indicados, se obtiene la información necesaria para el reconocimiento. Uno de los métodos más utilizados en el reconocimiento vascular es la exposición del órgano a luz infrarroja. Esto se debe, principalmente, a la diferencia de tonalidades que generan los tejidos y la sangre cuando entran en contacto con el infrarrojo cercano asemejando una imagen en escala de grises con alto contraste tal como se puede observar en la Fig. 1.

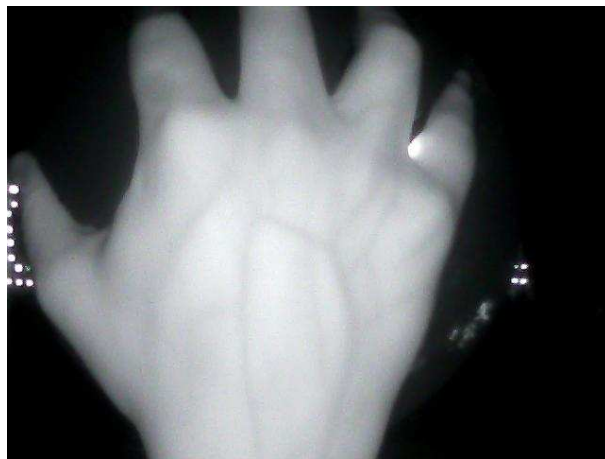


Figura 1. Prueba de captura realizada con el dispositivo biométrico implementado.

El punto de inflexión de esta fase es la longitud de onda de la luz generada tal como lo describe Marcotti (Marcotti, Hidalgo, y Mathé, 2012) en su método. Este factor cuantitativo define la profundidad que puede llegar a alcanzar

el haz de luz que entra en contacto con los tejidos del órgano (Fig. 2).

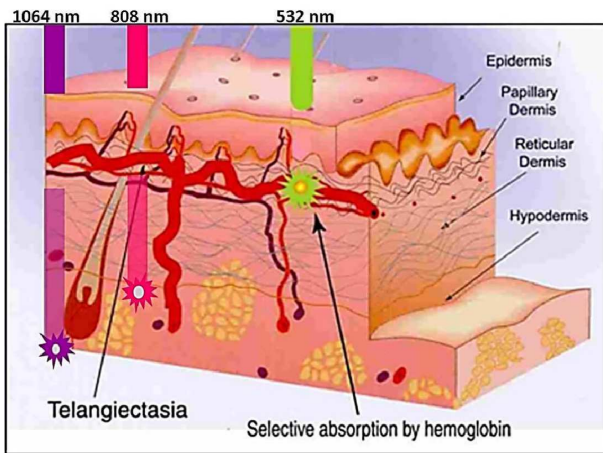


Figura 2. Profundidad de penetración en la piel a diferentes longitudes de onda (Kampelmacher, 2009).

En muchos casos es necesario utilizar un dispositivo de fijación para mantener una única posición durante la captura y así obtener la mejor imagen posible para aplicarle el algoritmo que se esté desarrollando. Algunas experimentaciones se han orientado a tomar las uniones que se forman entre los dedos como puntos de referencia para delimitar una región localizada dentro la cara dorsal, en la cual se concentra la mayor información del indicador biométrico.

**2. Etapa de pre-procesamiento:** Después de capturar la imagen es necesario realizar la extracción de puntos característicos o minucias (Aguilar et al., 2008). Existen una serie de alternativas para realizar este proceso como estudios morfológicos, análisis de multi-resolución y otros tantos que amplían el espectro de soluciones frente a esta consideración puntual.

Normalmente, el patrón de las venas es capturado en escala de grises, sujeto a *efectos de ruido*. La reducción del ruido y el ajuste del contraste son fundamentales para garantizar la calidad y eficiencia de los procesos asociados a la extracción de características (Scheuermann, Schwiderski, y Struif, 2000). Esto se consigue por medio de tres operaciones: *Binarización*, capaz de transformar el patrón de escala de grises en una imagen en blanco y negro; *esqueletización*, capaz de reducir el ancho de las líneas a un píxel y *aislado*, capaz de eliminar los puntos alejados no deseados (Fig. 3). Para finalizar, se implementa un algoritmo automático de aclaración capaz de manipular la imagen, utilizando filtros en diferentes dominios, tal que se obtenga el mapa vascular de la zona estudiada que será almacenado como el patrón que identifica a un usuario particular.

**3. Etapa de reconocimiento y verificación:** En esta última etapa se busca obtener un indicador de autenticidad para

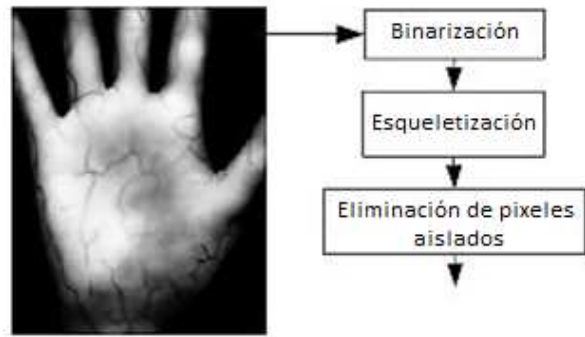


Figura 3. Secuencia de operaciones para reducción de ruido y ajuste de contraste (Malki y Spaanburn, 2010).

el reconocimiento automático de personas. Con el objeto de realizar un análisis comparativo del desempeño y aplicabilidad de técnicas basadas en modelos conexionistas y en la teoría de decisión, se realiza la implementación de esta última etapa utilizando redes neuronales artificiales y correlación de los descriptores del patrón.

Como método de verificación se puede implementar la correlación, definida como un método de reconocimiento basado en la teoría de decisión que no requiere una etapa previa de entrenamiento. El proceso de clasificación se basa en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre el vector de características del patrón de una imagen de entrada aleatoria con los de la totalidad de imágenes de registro almacenadas en la base de datos (Motato y Loaiza, 2009).

### Estudio y diseño de sistema de captura de imágenes

Para lograr cumplir con los estándares de calidad asociados al tratamiento de imágenes, fue necesario experimentar exhaustivamente los posibles métodos de iluminación y su funcionamiento en diferentes estructuras con variantes de dimensión y material. A continuación, se describe de manera breve cada prueba y los resultados obtenidos.

### Prototipo A

Las consultas realizadas en un principio generaban una necesidad por ampliar el campo de acción de los emisores IR antes o durante el contacto con la extremidad estudiada. Por esto, se utilizó una caja metálica y se dispusieron 24 LEDs IR en la parte superior tal que, impactasen directamente y las pérdidas de iluminación disminuyeran.

En la Fig. 4 se puede observar los resultados de la implementación de este prototipo y la calidad de imagen que genera.

A primera vista, sobresale la intención de generar o definir el área de interés pero no se llega al objetivo debido a

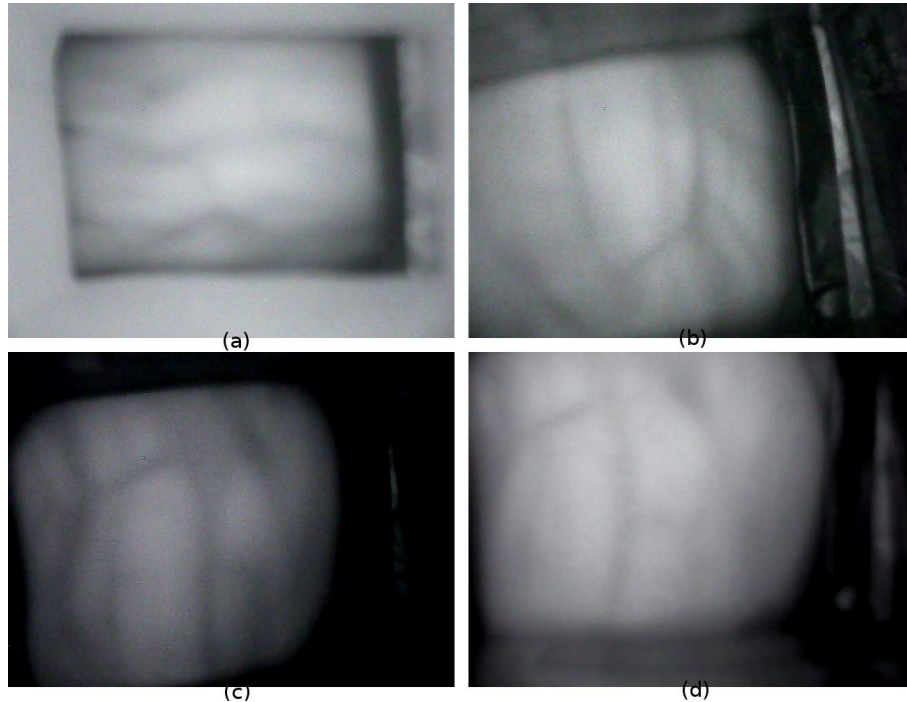


Figura 4. Prototipo A. (a) Prueba 1. (b) Prueba 2. (c) Prueba 3. (d) Prueba 4.

la inexistencia de una barrera que limite, en su totalidad, el movimiento de la mano. Se observa un sistema de iluminación muy pobre y dependiente de la posición de la extremidad y, finalmente, se concluye que el prototipo no garantiza la captura de un dato completo y confiable para la aplicación deseada.

### Prototipo B

Gracias a las conclusiones del primer prototipo, se define un segundo dispositivo con una iluminación mayor (40 LEDs), un modelo que delimitase el área de la captura y, basados en los resultados de la investigación de (Motato y Loaiza, 2009), un sistema abierto con un ángulo de incidencia de la matriz de LEDs respecto a la extremidad de 90 grados.

En la Fig. 5 se puede observar los resultados de la implementación de este prototipo y la calidad de imagen que genera.

En estas pruebas, el sistema de iluminación mejoró considerablemente pero presenta regiones de alto brillo que podrían llegar a eliminar los rasgos característicos después de pasar la etapa de pre-procesamiento. El molde que se utilizó (semiesfera con forma de mano) es óptimo y, como valor agregado, se detectó que en la posición cóncava se exhiben con más intensidad las venas mejorando la imagen y facilitando la extracción de los rasgos. Después de este análisis, se decide crear un tercer modelo que comprenda las

virtudes de los dos prototipos y que solucione los detalles observados en esta segunda estructura.

### Prototipo C

En este último modelo se trabajó enfáticamente en el sistema de iluminación y su optimización para facilitar el tratamiento computacional. De este modo, se determinó utilizar 80 LEDs IR (una matriz en la parte superior y otra en la parte inferior de la extremidad) limados en sus puntas para obtener un espectro difuso con menor brillo, sin perder sus características de profundidad (longitud de onda). El molde se mantuvo gracias a su aporte a la imagen capturada y, con esta combinación, los resultados que se obtuvieron se reflejan en la Fig. 6.

Finalmente, se consideró innecesario mejorar la captura de este tercer dispositivo puesto que el tratamiento de la imagen permitía cierto factor de ruido siempre y cuando los patrones fuesen perceptibles y estables.

### Sistema de fijación o de limitación del área de captura

Dentro de las pruebas realizadas con los tres prototipos, se observó la necesidad de delimitar el movimiento del órgano tal que, se redujese la tasa de error presente entre dos o más capturas de un mismo usuario. Por esto mismo, se hizo necesaria la aplicación de un equipo de fijación en forma de semiesfera, con una horma que se asemeje a una mano, capaz de mitigar esa condición errática y facilitar la extracción de la ROI (Región de Interés).



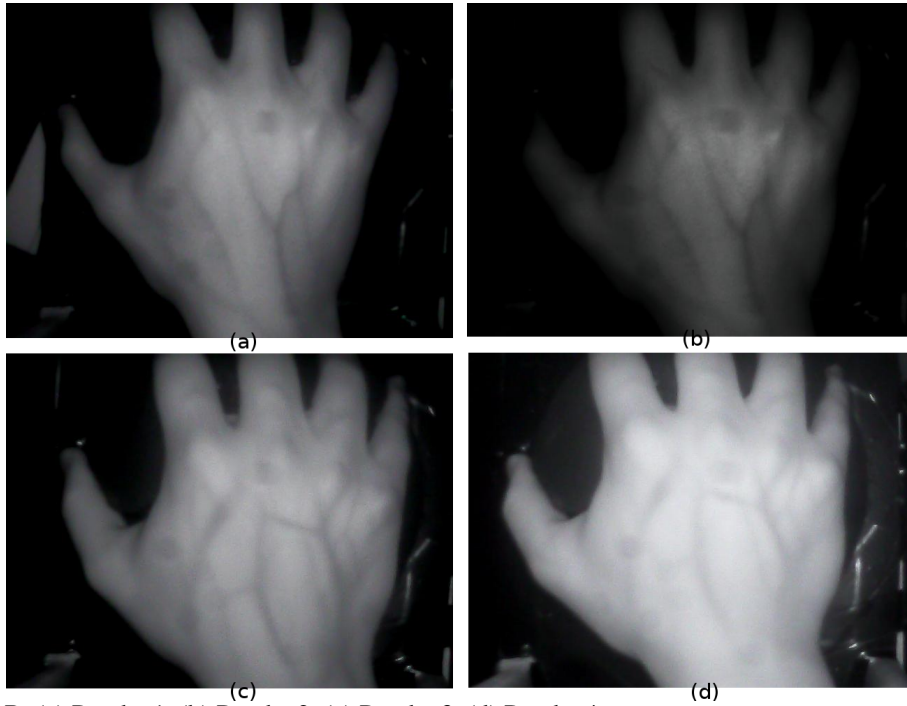


Figura 5. Prototipo B. (a) Prueba 1. (b) Prueba 2. (c) Prueba 3. (d) Prueba 4.

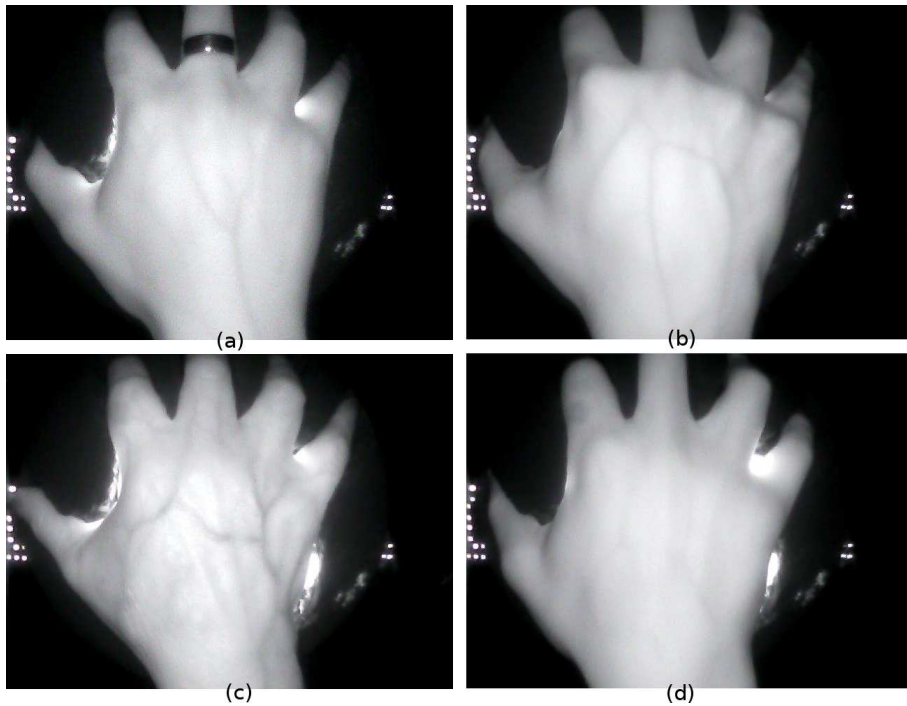


Figura 6. Prototipo C. (a) Prueba 1. (b) Prueba 2. (c) Prueba 3. (d) Prueba 4.

### Desarrollo del algoritmo de pre-procesamiento de imágenes

Después de considerar una serie de teorías descritas ampliamente por (Hartung, Martin, y Busch, 2011;

Marcotti et al., 2012; Motato y Loaiza, 2009; Suárez, 2011; Suri, Liu, Reden, y Laxminarayan, 2002) se concluyó que no existe un método pre-establecido capaz de procesar todas las imágenes sin presentar variaciones o fallas que

son considerables al momento de implementar dispositivos biométricos o biomédicos.

Por esto mismo, se utilizaron funciones matemáticas y operaciones morfológicas particulares capaces de extraer en su totalidad los patrones característicos en las imágenes obtenidas, exclusivamente, con el dispositivo de captura de imágenes seleccionado en la primera fase del proyecto. A continuación se describe la teoría matemática que sustenta el proyecto y los resultados parciales de cada etapa que modifica la imagen hasta su objetivo final.

### Extracción de la ROI

La teoría que describe el análisis y hallazgo de la región de interés no tiene un direccionamiento exclusivo y, al igual que todo tipo de manipulación orientada a imágenes, depende de las necesidades y datos en particular que el diseñador desee obtener.

Debido a estas situaciones, se decidió implementar un sistema de fijación capaz de limitar en un alto porcentaje el movimiento de la mano y así capturar la misma región en todos los usuarios, tal como se puede observar en la Fig. 8. Esta aplicación permite predefinir una ROI, descrita gráficamente en la Fig. 7, y aplicar comandos más simples para su extracción y pre-procesamiento posterior.

### Realce de contraste

El trabajo de mejoramiento de la imagen solo se había realizado variando las condiciones del hardware, pero el resultado no era aceptable en el 100 % de los casos. A partir de estas consideraciones, se hizo necesaria la aplicación de una instrucción capaz de equalizar el histograma de la imagen a partir de las condiciones de contraste-limitado. Este procedimiento consiste en una transformación no lineal que considera la distribución acumulativa de la imagen original, para generar una resultante cuya representación gráfica será aproximadamente uniforme (Martín, 2012). En la Fig. 9 se evidencian los cambios en los histogramas de dos imágenes, y en las Figs. 10 se observa el resultado del realce en seis usuarios.

### Función Gaussiana

Para lograr la extracción de líneas del dorso de la mano, se emplea la función Gaussiana en una dimensión (1-D), su primera derivada y su segunda derivada a partir de puntos definidos para cada expresión.

Partiendo de la función Gaussiana en 1-D, se crean dos máscaras, (Ecu. 1) y (Ecu. 2), que permitan modificar la imagen original en una dirección predefinida conocidas como detectores de línea en la dirección  $\theta$ .

$$H_1^\theta = G_{\sigma s} * (G'_{\sigma d})^T \quad (1)$$

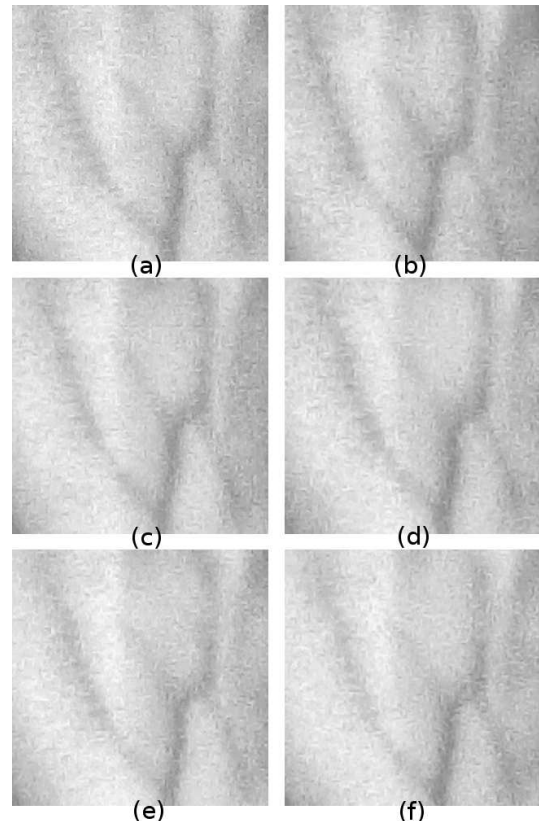


Figura 8. ROI de usuario de prueba. (a) Captura 1. (b) Captura 2. (c) Captura 3. (d) Captura 4. (e) Captura 5. (f) Captura 6.



Figura 10. Realce de contraste. (a) Usuario 1. (b) Usuario 2. (c) Usuario 3. (d) Usuario 4. (e) Usuario 5. (f) Usuario 6.

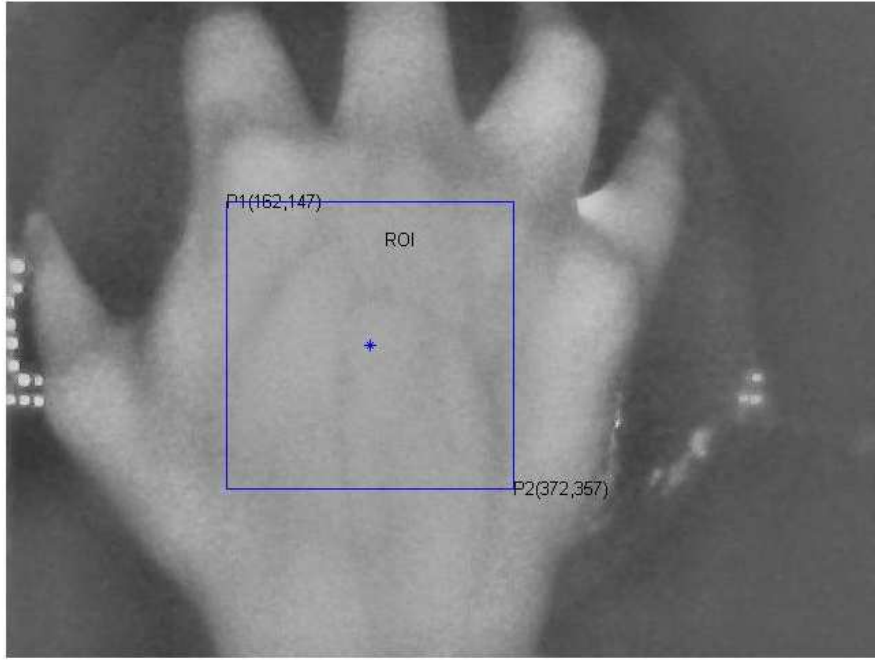


Figura 7. Extracción de región de interés a partir del centro de masa de la cara dorsal de la mano.

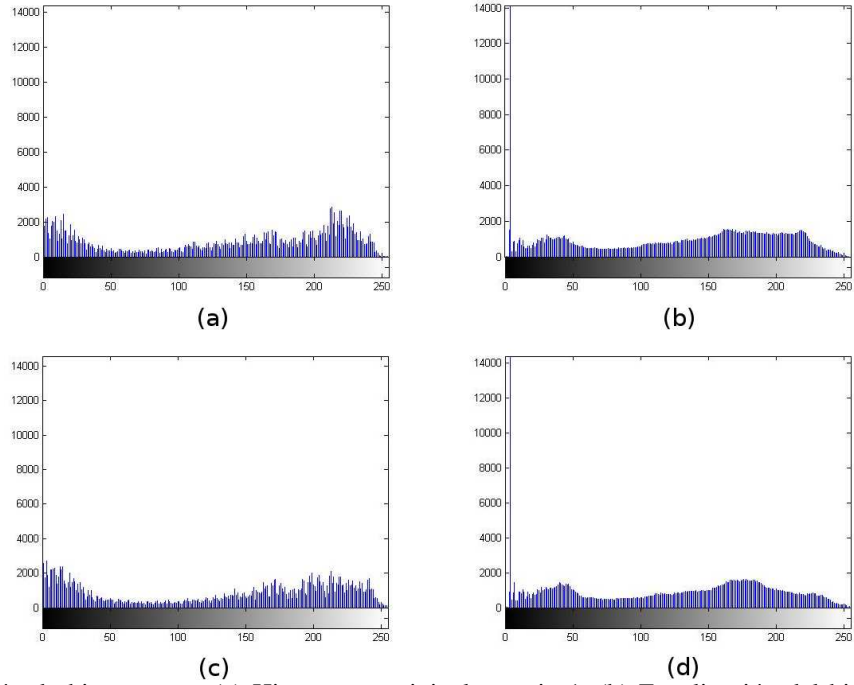


Figura 9. Ecuación de histogramas. (a) Histograma original usuario 1. (b) Ecuación del histograma usuario 1. (c) Histograma original usuario 2. (d) Ecuación del histograma usuario 2.

$$H_2^\theta = G_{\sigma_s} * (G''_{\sigma_d})^T \quad (2)$$

Donde  $G_{\sigma_s}$  es la función Gaussiana en 1-D con varianza  $\sigma_s$ ,  $G'_{\sigma_d}$  es la primera derivada de la gaussiana,  $G''_{\sigma_d}$  es

la segunda derivada de la Gaussiana,  $T$  es la operación transposición y  $*$  es la operación convolución.

Para acentuar la diferencia entre las venas y los tejidos se calculan la primera y segunda derivada ( $I'$  y  $I''$ ) definidas

como la convolución entre la imagen, enunciada para este análisis como  $I(x,y)$ , y las máscaras de la primera y la segunda derivada de la función gaussiana en tres direcciones que se obtienen al rotar las componentes un ángulo  $\theta$ . En este caso particular, se decidió realizar la extracción en 45 grados, 90 grados y 135 grados, ya que aportan información adicional y única para la reconstrucción de las líneas (Ecus. 3 y 4, y Figs. 11 y 12).

$$I' = I * H_1^\theta \quad (3)$$

$$I'' = I * H_2^\theta \quad (4)$$

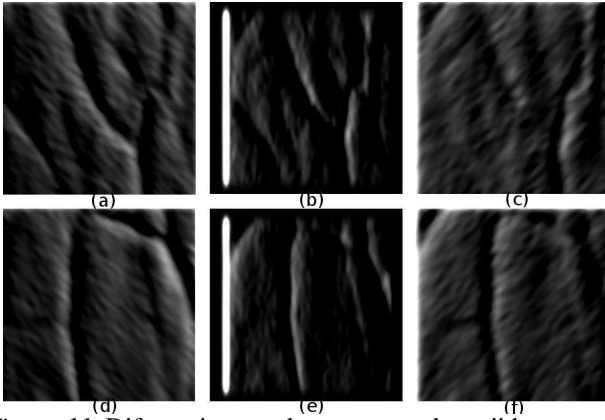


Figura 11. Diferencia entre las venas y a los tejidos a partir de la primera derivada en la dirección  $\theta$ . (a) Usuario 1  $\theta = 45$  grados. (b) Usuario 1  $\theta = 90$  grados. (c) Usuario 1  $\theta = 135$  grados. (d) Usuario 2  $\theta = 45$  grados. (e) Usuario 2  $\theta = 90$  grados. (f) Usuario 2  $\theta = 135$  grados.

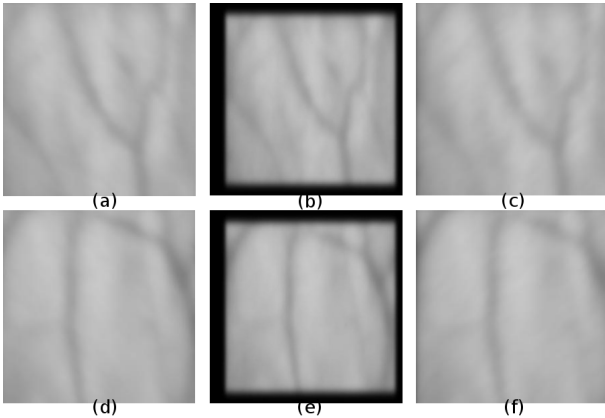


Figura 12. Diferencia entre las venas y a los tejidos a partir de la segunda derivada en la dirección  $\theta$ . (a) Usuario 1  $\theta = 45$  grados. (b) Usuario 1  $\theta = 90$  grados. (c) Usuario 1  $\theta = 135$  grados. (d) Usuario 2  $\theta = 45$  grados. (e) Usuario 2  $\theta = 90$  grados. (f) Usuario 2  $\theta = 135$  grados.

Para encontrar las líneas, en una dirección  $\theta$ , del dorso de la mano, se buscan los puntos de cruce por cero de  $I'$  en la

dirección  $\theta + 90$  y se asocian a su respectivo par ordenado en  $I''$ . Esta pareja se adhiere a una nueva matriz, y los píxeles que no cumplan esta condición se llevan a cero para obtener una que diferencie los tejidos del mapa circulatorio que se está estudiando. Matemáticamente, esta fase se describe en Ecu. 5.

$$L_\theta^1(x,y) = \begin{cases} I''(x,y), & I'(x,y) = 0 \\ 0, & I'(x,y) \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Se procede a buscar los valles de la imagen (venas de la mano) verificando el signo de  $L_\theta^1$ . Si el valor es mayor a cero, se asume que hay un dato que forma parte del patrón y no se altera, pero si se presenta un valor distinto, se asocia al tejido y se descarta tal como se observa en Ecu. 6.

$$L_\theta^2(x,y) = \begin{cases} L_\theta^1(x,y), & L_\theta^1(x,y) > 0 \\ 0, & L_\theta^1(x,y) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Finalmente, se realiza una superposición de imágenes con una operación OR (Ecu. 7) que permita observar los efectos de las ecuaciones en cada dirección predefinida.

$$L(i,j) = OR L_\theta(i,j) \quad (7)$$

### Binarización

Esta función permite, a partir de un parámetro pre-establecido, aproximar los valores de cada píxel de una imagen a su valor binario más próximo, y generar una resultante en dos tonalidades. Para el análisis vascular, los tejidos se representará por el nivel bajo o negro (0 lógico) y las venas estarán caracterizadas por el nivel blanco o alto (1 lógico) tal como se puede observar en la Fig. 13.

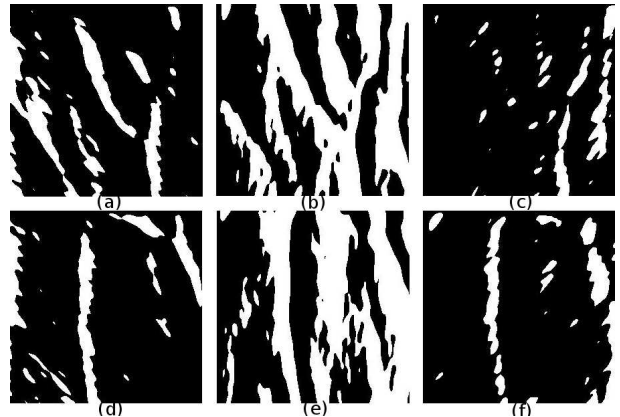


Figura 13. Binarización de matrices resultantes de la extracción de líneas en la dirección  $\theta$ . (a) Usuario 1  $\theta = 45$  grados. (b) Usuario 1  $\theta = 90$  grados. (c) Usuario 1  $\theta = 135$  grados. (d) Usuario 2  $\theta = 45$  grados. (e) Usuario 2  $\theta = 90$  grados. (f) Usuario 2  $\theta = 135$  grados.

## Operaciones morfológicas

Para llevar las resultantes de cada etapa, descrita previamente, al patrón característico del usuario, se implementaron tres (3) operaciones morfológicas capaces de eliminar todo tipo de información inútil o despreciable, y entregar la imagen apta para aplicación en dispositivos biométricos de acceso. En la Fig. 14 se presentan los efectos de cada operación sobre las matrices obtenidas en la función anterior.

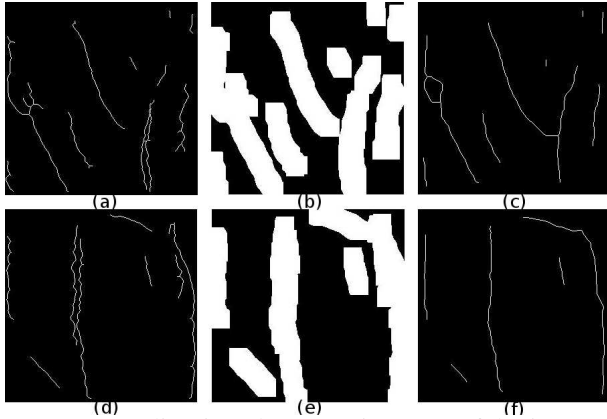


Figura 14. Aplicación de operaciones morfológicas para mejoramiento de la matriz resultante (a) Encogimiento usuario 1. (b) Dilatación usuario 1. (c) Adelgazamiento usuario 1. (d) Encogimiento usuario 2. (e) Dilatación usuario 2. (f) Adelgazamiento usuario 2.

A continuación, por medio de un diagrama de bloques (Fig. 15), se sintetiza la etapa de pre-procesamiento de la imagen.

## Resultados

Después de aplicar cada etapa del pre-procesamiento de imágenes planteado, se lograron extraer los patrones característicos asociados a un grupo de usuarios que participaron de las pruebas visualizadas en la descripción previa de cada fase del sistema implementado. En la Fig. 16 se observan las resultantes para ciertos usuarios después de ejecutar el proceso descrito en la Fig. 15 (diagrama de bloques).

## Conclusiones

A pesar de las garantías que brinda el sistema de biometría vascular, producto de su invariancia en el patrón característico ante enfermedades vasculares, paso del tiempo o cualquier acción asociada al sistema circulatorio. Se observó que ciertas condiciones genéticas, como el adelgazamiento de las venas del usuario, pueden llegar a limitar el correcto funcionamiento de la etapa de captura

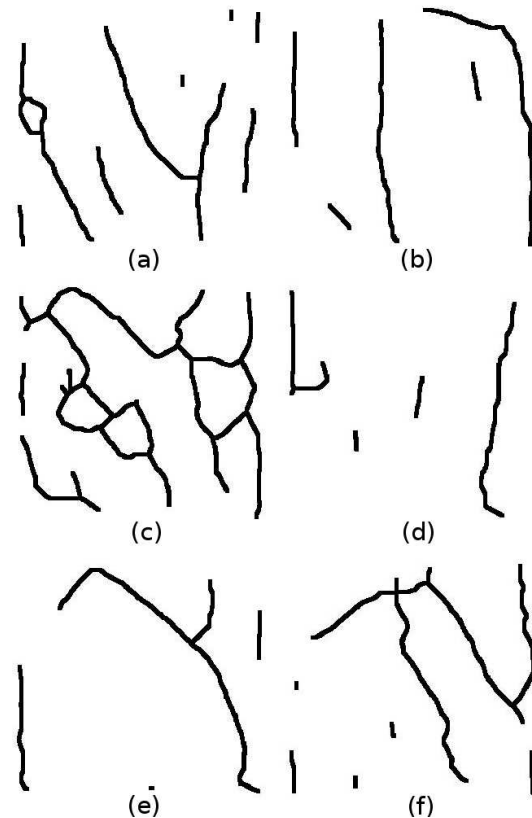


Figura 16. Patrones resultantes del pre-procesamiento de imágenes. (a) Usuario 1. (b) Usuario 2. (c) Usuario 3. (d) Usuario 4. (e) Usuario 5. (f) Usuario 6.

y, por ende, no generar un dato de alta fiabilidad para su aplicación en dispositivos de control de acceso.

Durante el desarrollo del proyecto, se encontró un punto crítico capaz de optimizar o limitar la capacidad de adquisición de datos del mismo: el sistema de iluminación. Esta fase, se modificó en tres oportunidades logrando un mejoramiento de la imagen conforme se ampliaba el campo de acción generado. Para investigaciones futuras, se pretende extender el tiempo de estudio del tema para obtener una etapa de hardware inmejorable y sin falencias frente a situaciones aisladas que puedan generar desconfianza al usuario final.

A partir de las consultas y pruebas realizadas durante el proceso de formulación y ejecución del proyecto, fue posible comprender el amplio espectro de métodos existentes, capaces de ejecutar el pre-procesamiento de imágenes con los estándares de calidad más altos y errores, considerados en muchas ocasiones, nulos. En resumen; la necesidad que se genere al momento de lograr una primera captura, es la base de la propuesta programable que se presente y debe estudiarse de manera heurística para lograr datos ciertos y limpios para las diferentes aplicaciones para las que, previamente, haya sido diseñada.

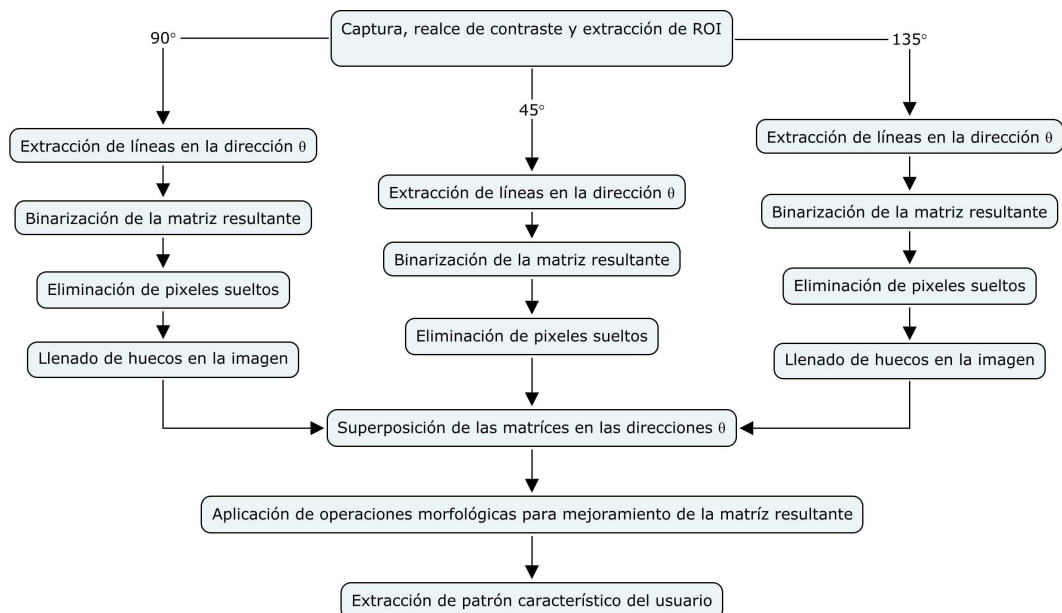


Figura 15. Descripción del proceso de extracción de patrones característicos.

### Agradecimientos

Agradecemos al grupo de investigación DIGITI y a los ingenieros Edwar Jacinto Gomez y Jorge Fandiño por su dedicación a esta investigación.

### Referencias

Aguilar, G., Sánchez, G., Toscano, K., Nakano, M., y Pérez, H. (2008). Reconocimiento de huellas dactilares usando características locales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(46), 101-109.

FTC. (2003, September). *Ftc releases survey of identity theft in u.s. 27.3 million victims in past 5 years, billions in losses for businesses and consumers.* (Federal Trade Commission)

Grupo ATENEA. (2011). *Biometría: Informe tecnológico y sectorial.* (Alta Eficacia Tecnológica)

Hartung, D., Martin, S., y Busch, C. (2011). Quality estimation for vascular pattern recognition. En *International conference on hand-based biometrics (ichb 2011).*

Kampelmacher, P. (2009). *Láser nd-yag de pulso largo de alta performance.* (Ep-Advance)

Kroll. (2012). *Global fraud report. vulnerabilities on the rise.* (Annual Edition)

Malki, S., y Spaanenburn, L. (2010). Cbas: A cnn-based biometrics authentication system. En

*12th international workshop on cellular nanoscale networks and their applications (cnaa 2010)* (p. 1-6).

Marcotti, A., Hidalgo, B., y Mathé, L. (2012). *Método de detección de venas no invasivo utilizando luz infrarroja.* (Universidad Nacional de Córdoba)

Martín, E. (2012). *Análisis de imágenes basado en correlación de imágenes.* (E.U.I.T. Telecomunicación (UPM))

Motato, O., y Loaiza, H. (2009). Identificación biométrica utilizando imágenes infrarrojas de la red vascular de la cara dorsal de la mano. *Ingeniería e Investigación*, 29(1), 90-100.

Sanz, G. (2009). *Desarrollo de un sistema de reconocimiento de huella dactilar para aplicaciones match-on-card.* (Universidad Autónoma de Madrid)

Scheuermann, D., Schwiderski, S., y Struif, B. (2000, September). *Usability of biometrics in relation to electronic signatures.* (EU Study 502533 8)

Suárez, J. (2011). *Mecanismos de captura y procesado de imágenes de venas para identificación personal.* (Universidad Carlos III de Madrid)

Suri, J., Liu, K., Reden, L., y Laxminarayan, S. (2002). A review on mr vascular image processing: skeleton versus nonskeleton approaches: part ii. *IEEE Transactions Inf Technol Biomed*, 6(4), 338-350.



# Prototipo de máquina fresadora CNC para circuitos impresos

*CNC milling machine prototype for Printed Circuit Boards*

Diego A. Alonso S.

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

John E. Gil D.

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

Fredy H. Martínez S.

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

---

Este artículo presenta la investigación, diseño y construcción de un prototipo de máquina fresadora CNC para fabricar circuitos impresos (PCB's) de una cara y ancho de trazo mínimo de 0.1 mm. El diseño del prototipo se llevó a cabo después una exhaustiva investigación, identificando las principales características que debería presentar, y teniendo en cuenta el uso final del mismo. La estructura mecánica esta conformada por una base o soporte, tres ejes ortogonales movidos por un sistema tuerca-tornillo sin fin, con el propósito de brindar uniformidad y precisión en el desplazamiento, cada uno accionado por un motor paso a paso. Los ejes X y Y cuentan cada uno con un riel para facilitar el desplazamiento. En la herramienta de control se usaron principios de CNC por medio del software LinuxCNC.

*Palabras clave:* Circuitos impresos, control numérico, máquina fresadora

This paper presents the research, design and construction of a CNC milling machine for Printed Circuit Boards (PCB's) of one side and a minimum track width of 0.1 mm. The design of the prototype was made an investigation, which identifies the characteristics that should present the prototype, and taking the final use. The mechanical structure is formed by a base, three orthogonal axes moved by a screw-nut system endless in order to provide uniformity and accuracy in displacement, each one driven by a stepper motor. The axes X and Y have a rail to easy movement. In the control tool were used CNC control by the LinuxCNC software.

*Keywords:* Milling machine, numerical control, printed circuit boards

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Alonso, D., Gil, J. y Martínez, F. (2015). *Prototipo de máquina fresadora CNC para circuitos impresos*. Revista Tekhnê, 12(1), 23-38.

## Introducción

La implementación de una máquina fresadora CNC para la fabricación de PCB, ha sido un tema de estudio e investigación para profesionales en el área de la electricidad y la electrónica, así como también lo ha sido para la industria y algunos centros educativos. Los desarrollos en la implementación de este tipo de prototipos se han dado en diversos campos trayendo consigo grandes avances. Tal es el caso de la implementación del CNC en prototipos de máquinas como tornos, fresadoras, cortadoras, etc, con movimientos en sus tres ejes (X,Y,Z) por medio de control numérico computarizado (Acuna, Gordon, y Nunez, 2013). Los ejes de estas máquinas son movidos por medio de tornillos accionados por servomotores o motores paso a paso. Las señales procedentes del controlador de la máquina son amplificadas por unas unidades, de modo que sean lo suficientemente potentes y adecuadamente programadas para operar los motores (Khanna, Kumar, Bhatnagar, y Tyagi, 2013).

La operación de fresado es uno de los sistemas de CNC mas modernos en los procesos de mecanizado para la eliminación de material, y el cual opera bajo el principio de movimiento de rotación (Elias, Yusof, y Minhat, 2013). Otro aspecto fundamental tenido en cuenta en la implementación del presente prototipo, se encuentra en la investigación de sistemas de control para máquinas con Control Numérico Computarizado, esto con el fin de obtener un modelamiento del sistema de control, para su respectivo análisis e interpretación. Una estructura de control con retroalimentación es la que brinda una mayor precisión y exactitud en sistemas de movimientos de varios ejes (S. Yeh y Sun, 2012). Sin embargo, en sistemas en los cuales se puede predecir el comportamiento de la salida, como es el caso del sistema de control CNC que se usa en el presente proyecto, un control de lazo abierto brinda simplicidad y facilidad sin disminuir desempeño (S. S. Yeh y Hsu, 2003).

El sistema de control tiene como propósito en términos generales, el objetivo de aumentar la eficiencia en los resultados del prototipo, ya que la importancia de un sistema de control se ve reflejada principalmente en la precisión de los trazos del PCB, la cual se obtiene generalmente con el control de los motores paso, y son estos los encargados de los movimientos en los ejes (X,Y,Z). Los parámetros del sistema de control de posición son sincronizados con el fin de reducir el posicionamiento y el error de contorno de la pieza a trabajar (Breaz y Racz, 2012). Sin embargo, después de la elaboración de uno o varios circuitos impresos, y debido al desgaste sufrido por la herramienta de corte, los errores van aumentando, lo que conduce a una disminución en la precisión de los trazos de los PCB's. Es por esta razón que este prototipo después de su completa terminación fue sometido a la evaluación de desempeño, por medio de la cual se realizaron las modificaciones pertinentes con el fin

de obtener la mayor precisión posible en los trazos de los PCB's.

Las investigaciones realizadas sobre la implementación del CNC en máquinas de movimiento han establecido en términos generales las principales herramientas y comandos necesarios para el óptimo funcionamiento de cualquier prototipo de máquina CNC. Entre las herramientas podemos encontrar: los ejes lineales, ejes de rotación, la pieza de trabajo y otros componentes. Los componentes de la estructura de herramientas se describen por el sistema de coordenadas cartesianas especificado por el punto original (punto de origen establecido) y otros tres puntos seleccionados de los tres ejes perpendiculares entre sí. Estos tres puntos son diferentes del origen del sistema de coordenadas de la máquina. Por otro lado, los comandos utilizados por un sistema CNC son normalmente códigos G, que contienen datos incrementales o absolutos de posición de cada eje (Ping, Jiangang, y Liang, 2012). Otra información relacionada al respecto, y producto de una interesante investigación, nos da un concepto más profundo en relación a la programación en un sistema CNC, y particularmente los códigos G. En ella se indica que la programación está integrada por una serie de funciones codificadas (un código estándar), que permite controlar el movimiento de la herramienta en la pieza de trabajo. Ese código estándar es denominado código G y M, en donde los códigos G, se definen como comandos preparatorios que tienen que ver con el movimiento de los ejes de la máquina (movimientos rápidos, avances, pausas, etc.). Por otro lado, los códigos M, son comandos de ejecución auxiliares que se requieren para el proceso de maquinado de las piezas, pero no son propiamente considerados como movimientos de la máquina (arranque, paro, cambio de herramienta, paro de programa, etc.) (Silva, 2008).

Para la implementación del CNC se requiere un sistema operativo eficiente, idealmente con acceso en tiempo real a los periféricos del computador, que brinde herramientas rápidas, dado que el objetivo principal de un sistema CNC es permitir la evaluación instantánea y secuencial de rendimiento de mecanizado (Abdul-Ameer, Al-kind, y Zughraer, 2011). Debido a que el diseño de la estructura en tiempo real para el sistema CNC debe ser relativamente alto, un sistema operativo convencional difícilmente satisface estos parámetros que necesita el sistema para un óptimo funcionamiento. De igual forma, si se considera que la función de los módulos CNC se encuentra dividida en dos partes: (1) un tiempo real bajo para la interfaz hombre-máquina, análisis del código, etc., y (2) una respuesta en tiempo real, principalmente para el control de los motores, es claro que se requiere que el sistema CNC tenga una velocidad alta, más funcional y adecuada para la alta velocidad que utilizan las herramientas de las máquinas CNC. Por lo anterior, el sistema operativo seleccionado para



el manejo del sistema es un RT-Linux (Linux con extensiones en tiempo real) (Linuxcnc.org, 2014) un sistema amplio que brinda las herramientas suficientes para el desarrollo de un proyecto de características similares a las del presente (Erwinski, Paprocki, Lech, Karwowski, y Wawrzak, 2013).

De esta manera, al igual que otras investigaciones y desarrollos relacionados con el tema trabajado (Cubides y Heredia, 2013), nuestro objetivo primordial fue el de construir un prototipo de máquina para la elaboración de circuitos impresos por el principio del fresado de material, en este caso la baquelita, para de esta manera producir un circuito impreso de una manera automatizada y mas rápida de los PCB's que se obtienen por la fabricación mediante los métodos manuales convencionales.

### Formulación del problema y perfil

#### Características del problema

La elaboración de circuitos impresos por métodos manuales es una tarea engorrosa y dependiendo de la técnica aplicada también muy contaminante (Novoa, 2002). La parte más difícil del proceso de fabricación de este producto es el diseño y elaboración de las pistas del PCB. Además de difícil puede llegar a convertirse en una labor molesta debido a que la fabricación a pequeña escala se realiza por métodos manuales en una serie de pasos, y puede tardarse hasta un día cuando se utiliza un método de fabricación con reacción química.

Actualmente en Colombia la creación de circuitos impresos, y en particular el prototipado a baja escala, es una actividad del área de la electricidad indispensable para trabajos de investigación y desarrollo. Se podría decir que los circuitos impresos son la base de cualquier desarrollo, modificación y/o actualización de una máquina o equipo.

Los PCB son comúnmente empleados en centros educativos con fines netamente académicos. Igualmente, pero con mayor importancia, son utilizados en la industria para la fabricación, reparación de maquinas y equipos. Los circuitos impresos en una producción a pequeña escala (prototipado) son hechos con métodos manuales (Novoa, 2002), de esta manera se observa la importancia y necesidad del prototipo para la fácil utilización de cualquier individuo que busque un trabajo en pequeña escala y con la mejor optimización posible de recursos.

#### Perfil funcional del prototipo

El sistema del prototipo se divide en las siguientes tres (3) componentes principales:

1. **Software:** Incluye el diseño del PCB mediante un programa de diseño CAD automatizado capaz de generar archivos en formato Gerber. La herramienta software utilizada aquí fue Eagle 7.2.0 (CadsoftUSA.com, 2015) (cualquier otra herramienta como Altium, KiCAD o

Visolate igual cumple los requisitos). La interfaz del usuario y generación del código G es realizado por la herramienta PCB-Gcode (Johnson, 2013). La visualización y comunicación de las coordenadas y demás datos necesarios a la máquina con la interpretación del código G es realizada mediante el software LinuxCNC (Linuxcnc.org, 2014) sobre un OS RT-Linux de 32 bits.

2. **Hardware electrónico:** Constituida por los dispositivos electrónicos como es la tarjeta de potencia TB6560 (StepperOnline, 2014), la cual se encarga de recibir los datos de control del equipo, en este caso el computador, y generar las señales de control - fuerza para cada uno de los ejes de posicionamiento.

3. **Estructura mecánica:** Corresponde a la estructura soporte, los ejes y el motor de fresado. La estructura mecánica se compone de tres ejes de posicionamiento, tres motores paso a paso encargados de movimiento entre cada uno de los ejes y por ultimo la máquina encargada de realizar el fresado.

En la Fig. 1 se observa el esquema del prototipo descrito anteriormente.



Figura 1. Diagrama de bloques del prototipo.

### Metodología

#### Diseño y construcción mecánica

La estructura mecánica de este prototipo esta conformado por los tres (3) ejes ortogonales y una (1) máquina rotativa, cada uno de ellos permiten obtener un movimiento de traslación lineal relacionado con el movimiento rotatorio del motor, cada motor tiene características propias, que fueron implementadas para mejorar el desempeño.

Para la construcción del prototipo se uso madera tipo Triplex de 15 mm de espesor, la elección de este material se llevo a cabo teniendo en cuenta el presupuesto establecido para el proyecto y la facilidad para trabajar este material con respecto a otros. La elaboración del diseño de cada eje de la estructura, al igual que el diseño final del prototipo, fueron realizados en la herramienta software SketchUp (SketchUp.com, 2015) y se presenta a continuación junto al registro fotográfico del prototipo de máquina fresadora para elaborar PCB's.

En la Fig. 2 y la Fig. 3 se observa el diseño e implementación de la estructura para el eje X. Esta estructura presenta un eje tuerca-tornillo de 3/8", un eje guía para mejorar la precisión del movimiento y dos rieles para tener un mejor desplazamiento.

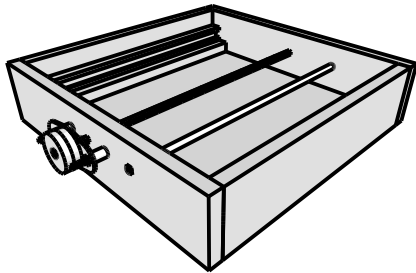


Figura 2. Diseño de la estructura del eje X.

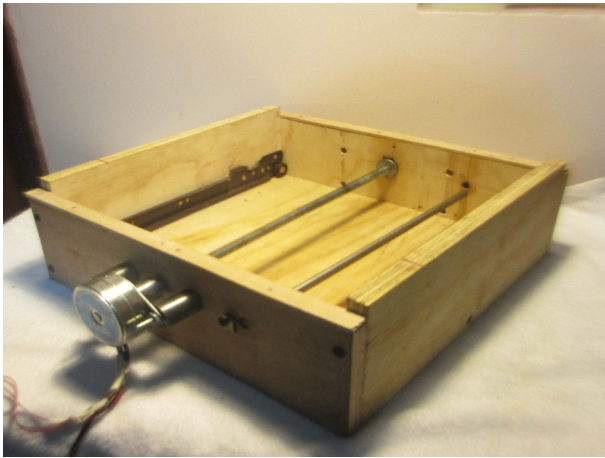


Figura 3. Estructura del eje X implementado.

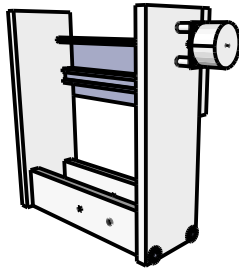


Figura 4. Diseño de la estructura del eje Y.

En la Fig. 4 y la Fig. 5 se observa el diseño e implementación de la estructura para el eje Y. Para esta estructura se utilizan dos soportes inferiores de madera cuya función principal es equilibrar todo el peso del eje Z a lo largo de todo el eje X, garantizando así la uniformidad del movimiento de la estructura al momento de aplicar la fuerza del desplazamiento transmitida por el motor paso a paso mediante el acoplamiento con el eje principal. Igualmente, el eje Y usa un eje tuerca-tornillo de 3/8", el cual es el encargado del desplazamiento del eje Y, y un riel ubicado en la parte trasera para mejorar el movimiento.

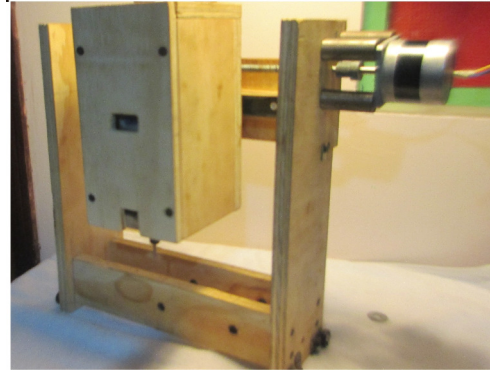


Figura 5. Estructura del eje Y implementado, con cajón del eje Z.

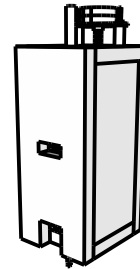


Figura 6. Diseño de la estructura del eje Z.



Figura 7. Estructura del eje Z implementado.

En la Fig. 6 y la Fig. 7 se observa el diseño e implementación de la estructura para el eje Z. Esta estructura al igual que los ejes X y Y presenta un eje tuerca-tornillo de 3/8", cuenta con un cajón externo, el cual es desplazado por el eje que transmite el movimiento lineal. Así mismo, cuenta un cajón interno donde se ubica la máquina de corte.

La implementación de los cajones externo e interno ayudan a que el desplazamiento que se presenta a lo largo del eje Z sea uniforme y con mayor precisión que si se utilizara un eje guía como el usado en el eje X.

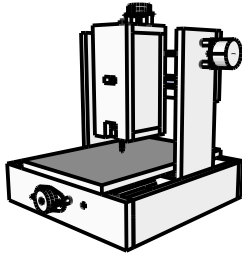


Figura 8. Diseño de la estructura de la máquina CNC.

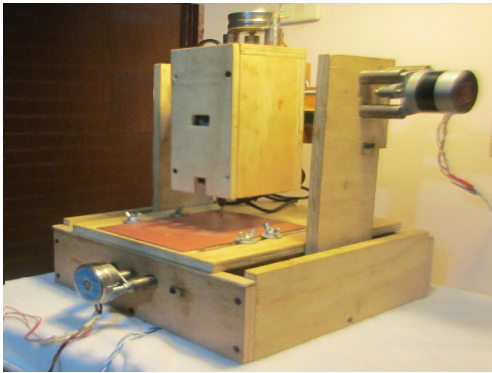


Figura 9. Estructura de la máquina fresadora CNC para elaborar PCB's.

En la Fig. 8 y la Fig. 9 se observa la estructura final de la máquina fresadora con principios de CNC para elaborar circuitos impresos. Cuenta con unas medidas generales determinadas así: eje X 330 mm × 338 mm, eje Y 337 mm × 115 mm y el eje Z 100 mm × 270 mm y una peso total de 10 Kg aproximadamente. Además, tiene tres motores paso a paso de 5 V y 5 Ω cada uno, los cuales son los encargados de generar el movimiento en cada uno de los ejes de prototipo. Los rieles implementados en cada uno de los ejes, son para mejorar el desplazamiento y disminuir el coeficiente de fricción en cada eje.

### Memorias de cálculo

**Potencia de maquinado.** (Lopez, Ortiz, Padilla, y Tabares, 2013)

Para calcular la potencia del motor que accionará la herramienta de corte, y las fuerzas que interactúan en el corte, se debe tener en cuenta diversas variables como son el material que quiere maquinarse, la profundidad del corte, el diámetro de la fresa, el número de dientes, el avance y la velocidad de corte (Lopez et al., 2013).

Para determinar la potencia de maquinado del prototipo, primero se determina el avance de la herramienta que está definida con la ecuación 1:

$$F_m = RPM IPT Z \quad (1)$$

Donde:

- $F_m$  = Avance de herramienta [mm/min].
- $RPM = 16000$  (Velocidad de trabajo de fresadora [1/min]).
- $IPT = 0,0254$  (Avance de fresa [mm/diente]).
- $Z = 1$  (Número de dientes de herramienta de corte).

Reemplazando las variables de la ecuación 1, se obtiene la ecuación 2:

$$\begin{aligned} F_m &= (16000)(0,0254)(1) \\ F_m &= 406,4 [mm/min] \end{aligned} \quad (2)$$

Con el resultado de la ecuación 2 se puede determinar la tasa de remoción del material, la cual está definida en la ecuación 3:

$$Q = \frac{F_m W_c d}{60000} \quad (3)$$

Donde:

- $Q$  = Tasa de corte o remoción de material [ $cm^3/s$ ].
- $F_m = 406,4$  (Avance de herramienta [mm/min]).
- $W_c = 0,4$  (Espesor de corte [mm]).
- $d = 0,1$  (Profundidad de corte [mm]).

Reemplazando las variables de la ecuación 3 se obtiene la ecuación 4:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(406,4)(0,4)(0,1)}{60000} \\ Q &= 0,27 \times 10^{-3} [mm^3/min] \\ Q &= 0,162 [cm^3/s] \end{aligned} \quad (4)$$

Finalmente, con el resultado en la ecuación 4 se puede determinar la potencia requerida de maquinado, la cual está definida en la ecuación 5:

$$P_c = K_p C Q W \quad (5)$$

Donde:

- $P_c$  = Potencia en herramienta de corte [kW].
- $K_p = 0,27$  (Constante de potencia).
- $C = 1,7$  (Factor de avance).
- $W = 1,1$  (Factor de desgaste de herramienta).
- $Q = 0,162$  (Tasa de corte o remoción de material [ $cm^3/s$ ]).

Reemplazando las variables de la ecuación 5 se obtiene la ecuación 6:

$$\begin{aligned} P_c &= (0,27)(1,7)(0,162)(1,1) \\ P_c &= 0,0818 [kW] \end{aligned} \quad (6)$$

**Potencia de motor.** (Lopez et al., 2013)

Esta es la potencia a transmitir a la herramienta de corte, la cual esta definida por la ecuación 7:

$$P_m = \frac{P_c}{E} \quad (7)$$

Donde:

- $P_m$  = Potencia del motor [kW].
- $P_c = 0,0818$  (Potencia en herramienta de corte [kW]).
- $E = 0,9$  (Factor de eficiencia de máquina/herramienta).

Reemplazando las variables de la ecuación 7 se obtiene la ecuación 8:

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{0,0818}{0,9} \\ P_m &= 0,0909 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (8)$$

Este valor indica que se necesita una herramienta con potencia mayor a 73,6 W para realizar el fresado. Este valor es inferior a la potencia nominal del motor encargado de transmitir la potencia a la herramienta de corte. La herramienta seleccionada es el Dremel 3000 la cual posee una potencia nominal de 130 W (Dremel, s.f.).

**Fuerza herramienta de corte.** (Lopez et al., 2013)

A pesar de que una fresa corta la baquelita y produce viruta de una manera muy similar al filo de la herramienta de corte para la fresadora, las esquinas de la broca remueven el material por una combinación bastante compleja de extrusión y corte (Lopez et al., 2013). Por esta razón, se debe utilizar otro método para estimar la potencia requerida para el fresado. Para ello se necesita la magnitud de la fuerza de la herramienta, la cual esta dada por la ecuación 9:

$$T = 0,05K_d F_f F_t B W + 0,007K_d D^2 J W \quad (9)$$

Donde:

- $T$  = Fuerza o empuje de la máquina/herramienta [N].
- $K_d = 4000$  (Factor de trabajo del material).
- $F_f = 0,06$  (Factor de avance).
- $F_t = 2,54$  (Factor de empuje para diámetro de la fresa).
- $B = 1,62$  (Factor de punto de fresa para empuje).
- $W = 1,1$  (Factor de desgaste de herramienta).
- $D = 3,2$  (Diámetro de fresa [mm]).
- $J = 0,16$  (Factor punta de fresa).

Reemplazando las variables de la ecuación 9 se obtiene la ecuación 10:

$$\begin{aligned} T &= [(0,05)(4000)(0,06)(2,54)(1,62)(1,1)] \\ &\quad + [(0,007)(4000)(3,2^2)(0,16)(1,1)] \\ T &= 104,778 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (10)$$

**Torque de los motores.** (Alciro.org, 2010)

Para determinar el torque necesario en cada motor paso a paso con el propósito de lograr el desplazamiento de cada uno de los ejes, es fundamental el análisis de las fuerzas de cada eje, como es la fuerza producida por inercia y la fuerza de la máquina/herramienta en el momento del fresado; para ello, se aplicaron las ecuaciones 11, 12 y 13. Igualmente fueron tenidos en cuenta para el calculo del torque de cada motor, que el sistema presenta una velocidad constante y un coeficiente de fricción despreciable debido a los rieles que disminuyen considerablemente este aspecto.

$$P_{eje} = M_{eje} g \quad (11)$$

Donde:

- $P_{eje}$  (Fuerza del eje producido por inercia [N]).
- $M_{eje}$  (Masa de la estructura en el eje [Kg]).
- $g$  (Valor de gravedad [m/s<sup>2</sup>]).

$$F_{eje} = T + P_{eje}\mu \quad (12)$$

Donde:

- $F_{eje}$  (Fuerza para mover la carga del eje [N]).
- $T$  (Fuerza o empuje de la máquina/herramienta [N]).
- $P_{eje}$  (Fuerza del eje producido por inercia [N]).
- $\mu$  (Coeficiente de fricción).

$$\tau_{eje} = F_{eje} \frac{P}{2\pi\eta} \quad (13)$$

Donde:

- $\tau_{eje}$  (Torque de la carga del eje [N · m]).
- $F_{eje}$  (Fuerza para mover la carga del eje [N]).
- $P$  (Paso de husillo [m]).
- $\eta$  (Rendimiento del husillo de paso).

A modo de simplificación, los resultados de las anteriores ecuaciones se observan en la tabla 1:

**Elección de los motores.** En la Fig. 10 se muestra la curva característica de un motor paso a paso de 1,8°, como el utilizado para el eje Y. En la gráfica se indica que para una velocidad de trabajo del motor de 100 rev/min, el torque es de aproximadamente 0,5 Nm. De esta manera y comparando con el torque hallado en las memorias de calculo de 0,305 Nm, se deduce que el motor Brother BH200575010 cumple con las características necesarias para mover el eje Y.

En la Fig. 11 se muestra el torque de un motor paso a paso SM 55 de 7,5°, como el utilizado para el eje X. En el cual se indica que para un motor de estas características el torque es de aproximadamente 0,4 Nm. Teniendo en cuenta el torque hallado en las memorias de calculo para el eje X es de 0,32 Nm, se concluye que el motor SM 55 series cumple con las características necesarias para transportar el eje X.

Del motor Aipax P/N LB82725 no se encontró ninguna gráfica ni registro del torque dado por el fabricante. Sin embargo, luego de pruebas en laboratorio, se determinó que

Tabla 1

Fuerzas y torques de cada eje del prototipo.

VARIABLES	EJE X	EJE Y	EJE Z
Masa de la estructura [Kg]	8,0	3,0	1,0
Gravedad [ $m/s^2$ ]	9,8		
Fuerza-Peso [N]	78,4	29,4	9,8
Fuerza de la máquina/herramienta [N]	104,778		
Coefficiente de fricción	0,14		
Fuerza para mover la carga [N]	115,75	108,90	106,15
Paso del husillo [m]	0,015875		
Rendimiento del husillo de paso [N]	0,9		
Torque de la carga [Nm]	0,324958	0,305716	0,294144

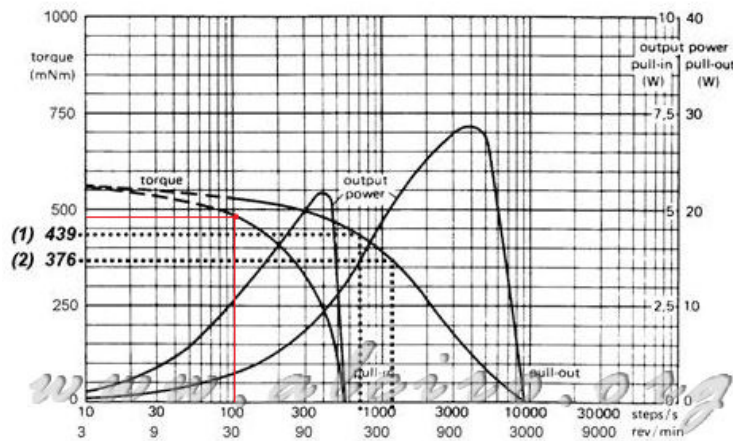


Figura 10. Curva característica de un motor paso a paso de 1,8 grados (Alciro.org, 2010).

MOTOR MODEL	UNITS	50SM	55SM	101SM	140SM
NEMA Motor Frame Size		23			
Stall Torque	N-m (oz-in)	0.3 (38)	0.4 (55)	0.6 (90)	1.0 (140)
Rated Phase Current	Amps	1	0.8	5	1.4
Recommended Driver Bus Voltage	Volts	40	160	40	160
Rotor Inertia	kg-m <sup>2</sup> (oz-in-s <sup>2</sup> )	$12 \times 10^{-6}$ ( $1.66 \times 10^{-3}$ )	$10 \times 10^{-6}$ ( $1.42 \times 10^{-3}$ )	$35 \times 10^{-6}$ ( $5 \times 10^{-3}$ )	
Full Step Angle	Degrees	1.8			
Accuracy	Degrees	$\pm 0.054$ (non-cumulative)			
Maximum Radial Load	N (lb)	67 (15)			
Maximum Thrust Load	N (lb)	111 (25)			
Weight	kg (lb)	0.6 (1.4)	0.7 (1.5)	1.3 (2.8)	1.4 (3.1)

Figura 11. Torque del motor paso a paso SM 55 (INC, 2008).

el motor posee características muy cercanas a las del motor del eje X. Además, el peso y desplazamiento son menores que los del eje X, por esto se asumió también el mismo torque para este motor.

### Sistema CAD/CAM

En cualquier diseño de PCB es necesario definir el esquemático del circuito y el diagrama de conexiones que formarán las pistas de cobre sobre la placa. Generalmente esto se hace en dos fases: en primer lugar, partiendo de las especificaciones sobre la funcionalidad del circuito, se deciden los componentes a utilizar y las interconexiones necesarias entre ellos, y a través del editor de esquemas del software se realiza el diagrama esquemático. Después, con esta información, se define la máscara en el editor del arte del PCB, que es una representación virtual de los componentes sobre la placa, y se establece la forma física de las conexiones entre ellos (Salas, Pérez, y Ramírez, 2007).

Para el diseño de los PCB's hay una amplia gama de software CAD que se puede acomodar a las necesidades de cada proyecto, algunos de los cuales se pueden ver en la tabla 2:

Es importante aclarar que en la tabla 2 solo encontramos algunas herramientas CAD (Diseño Asistido por Computadora) comerciales. En el mercado se pueden encontrar cientos de programas de diseños que presentan características particulares de acuerdo al propósito o necesidad del diseñador, sin mencionar otras de tipo *open source*.

Para el diseño de PCB's y demostrar la funcionalidad del prototipo, la herramienta CAD seleccionada es Eagle PCB Design Software de CadSoft, entre otras cosas por que ofrece:

- Editor de esquemas, editor de diseño, módulos editor de bibliotecas con interfaces de usuario idénticos.
- Compatible con Windows, Linux y Mac.
- Versión libre (con bibliotecas limitadas).
- Exportación de archivos Gerber que se pueden utilizar en cualquier plataforma.
- Gran cantidad de librerías desarrolladas por terceros (CadsoftUSA.com, 2015).

En la Fig. 12 se puede observar la pantalla principal de Eagle. En ella es posible observar las librerías disponibles, las normas de diseño, los lenguajes de usuarios, entre otras opciones de este software.

Un ejemplo de la aplicación de la herramienta Eagle se puede observar en la Fig. 13, donde se muestra el esquemático de un circuito electrónico, y en la Fig. 14 se observa el arte de PCB de circuito impreso.

Finalizado el diseño del PCB, el siguiente paso es la generación del código G y para esto es necesario la utilización de un Programa de Lenguaje de Usuario (ULP) que permite hacer placas de circuito impreso para usarse en la

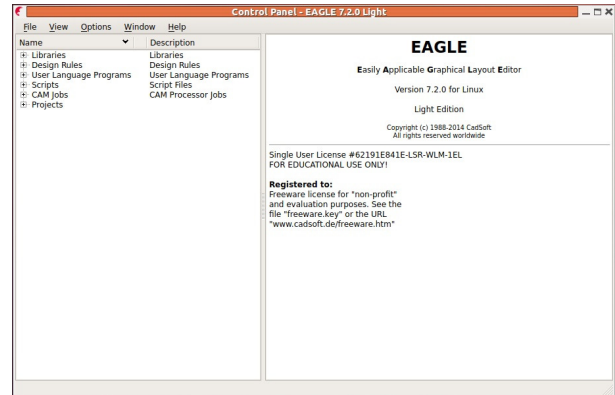


Figura 12. Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor).

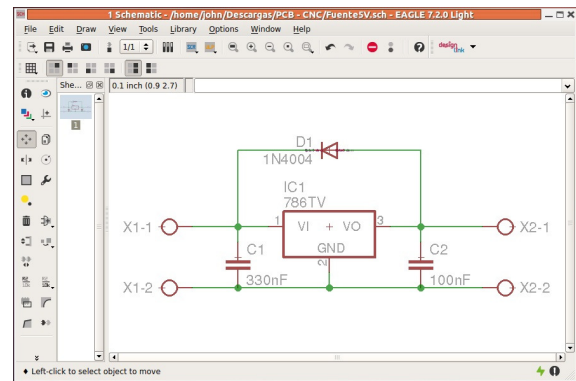


Figura 13. Ejemplo de esquemático de los PCB's.

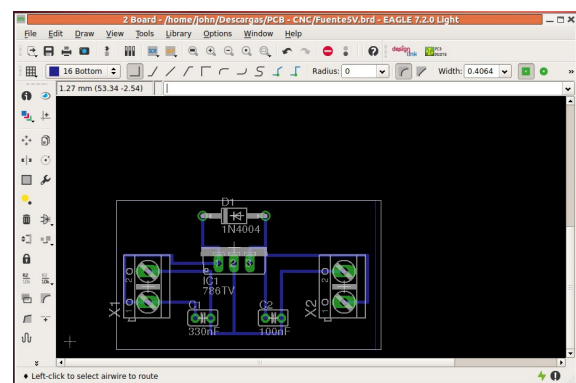


Figura 14. Ejemplo de diseño de los PCB's

fresadora CNC y así cortar los restos de cobre en la baquelita. En este caso, el programa usado es PCB-Gcode (Johnson, 2013).

**Configuración del PCB-Gcode.** Para la generación del código G es importante configurar el programa del PCB-Gcode. Para ello, la Fig. 15, la Fig. 16 y la Fig. 17 muestran la configuración del software con referencia al

Tabla 2

Algunas herramientas CAD para la diseño de PCB's.

Empresa o fabricante	Nombre del CAD	Esquemático y PCB	Referencia
Cadence	Orcad	Capture y Orcad PCB	(Cadence.com, 2015)
National Instruments	Circuit Design	Multisim y Ultiboard	(NationalInstruments.com, 2015)
Labcenter	Proteus	Isis y Ares	(Labcenterelectronics.com, 2015)
Cadsoft	Eagle	Schematic y Board	(CadsoftUSA.com, 2015)

prototipo, las variables y las opciones necesarias para la creación física de la PCB; pero si queda alguna duda se puede consultar con el manual de usuario (Johnson, 2013).

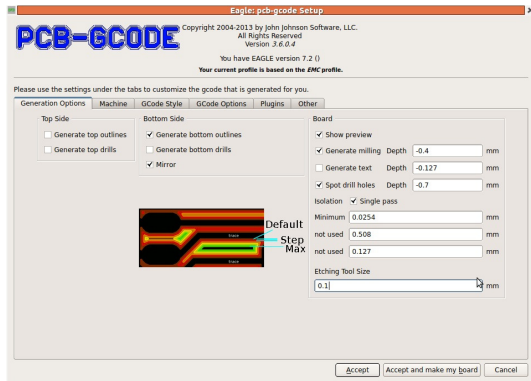


Figura 15. PCB-GCODE (Opciones de generación)

En la Fig. 15 se muestran las opciones de la pestaña de *Generation Options* (Opciones de generación). Aquí es donde puede ser seleccionado los diversos archivos a producir por PCB-Gcode, y las opciones comunes se puede ajustar. Ahora, una breve descripción de las opciones:

- **Top Side** (Lado superior): Opciones que tienen que ver con las pistas y agujeros de la parte superior de la placa.
- **Bottom Side** (Lado inferior): Opciones que tienen que ver con las pistas y agujeros de la parte inferior de la placa.
- **Board** (Placa): Opciones generales que se aplican a la placa.

En la Fig. 16 se muestran las opciones de la pestaña de *Machine* (Máquina). Aquí es donde se realizan la configuración del software con referencia a la máquina CNC. Ahora, una breve descripción de las opciones utilizadas:

- **Z Axis** (Eje Z): Configuración del eje Z.
- **Tool Change** (Cambio de herramienta): Posiciones de cada uno de los ejes en el momento de cambio de punta/herramienta.

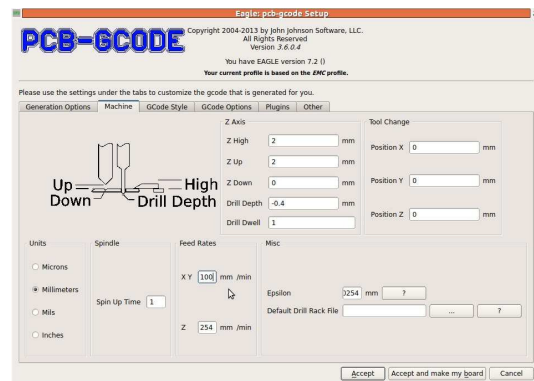


Figura 16. PCB-GCODE (Máquina)

- **Units** (Unidades): Opción en la selección de las unidades de la configuración y del diseño del PCB.
- **Spindle** (Fresa): La opción *Spin Up Time* es el periodo de tiempo inicial en segundos que toma la fresadora para llegar a la velocidad de trabajo. En este caso, como la fresadora se controla externa y manualmente, este se parámetro puede ajustar a 1.

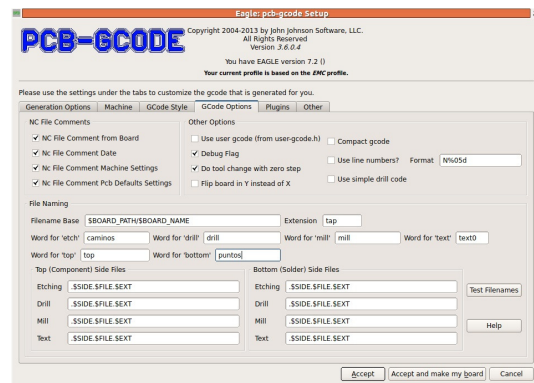


Figura 17. PCB-GCODE (Opciones del código G)

En la Fig. 17 se muestran las opciones de la pestaña de *G-Code Options* (Opciones del código G). Aquí es donde se permite la personalización de algunos de los contenidos del archivo de código G, así como de la denominación de los archivos. Ahora, una breve descripción de las opciones utilizadas:

- *NC File Comments* (Comentarios de los archivos): Opciones en los comentarios añadidos al archivo del código G.
- *Other Options* (Otras opciones): Opciones que afectan a cómo se genera el código G.
- *File naming* (Nomenclatura del archivo): Opciones de como desea nombrar los archivos.

Para finalizar, es importante afirmar que no se utilizaron todas las opciones que presenta el software PCB-Gcode, ya que estas opciones son complementarias al diseño y no son aplicable para la funcionalidad del prototipo.

Después de generado el código G, es necesario aplicar una herramienta CAM (Manufactura Asistida por Computadora) para la interpretación del código y así lograr la elaboración física de los PCB's. En este caso, la herramienta implementada es LinuxCNC.

LinuxCNC (*Enhanced Machine Controller* o EMC2) es un sistema de software para el control del computador para su uso con máquinas-herramienta como fresadoras y tornos. LinuxCNC es software libre con código fuente abierto (Linuxcnc.org, 2014).

Se escogió LinuxCNC, ya que ofrece:

- Varias interfaces gráficas de usuario, incluyendo una para pantallas táctiles.
- Un intérprete de Código G (el lenguaje de programación máquina herramienta RS-274).
- Un sistema de planificación de movimiento en tiempo real.
- Funcionamiento electrónico de la máquina de bajo nivel, como sensores y unidades de motor.
- Incluye un PLC programable de software con diagramas Ladder.
- Fácil instalación (Linuxcnc.org, 2014).

**Configuración inicial de LinuxCNC.** Para trabajar la máquina CNC en LinuxCNC, es importante la creación de una máquina virtual, y para esto, en las siguientes imágenes se muestra la configuración inicial de LinuxCNC utilizada en el prototipo.

En la Fig. 18 se muestran las opciones de la pantalla *Basic machine information* (Información básica de la máquina); Ahora, una breve descripción de las opciones:

- *Machine* (Máquina): Opciones para la nomenclatura de la máquina, la configuración de los ejes y las unidades de trabajo.
- *Driver characteristics* (Características de la tarjeta): Opciones que tienen que ver con las características de la

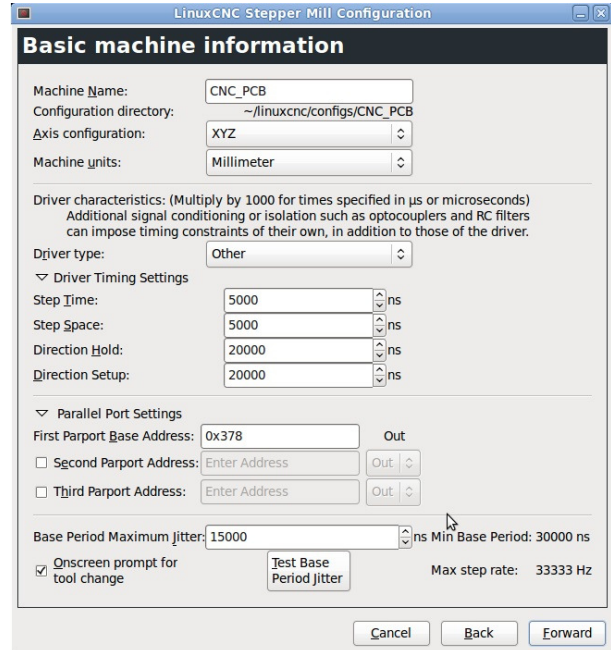


Figura 18. LinuxCNC (Información básica de la máquina)

tarjeta de potencia a utilizar, en este caso, la tarjeta TB6560 (StepperOnline, 2014).

- *Base Period Maximum Jitter*: Esta variable es dependiente del equipo de computo a utilizar; para calcular esta variable, LinuxCNC tiene la opción Test Base Period Jitter el cual produce los datos que necesita.

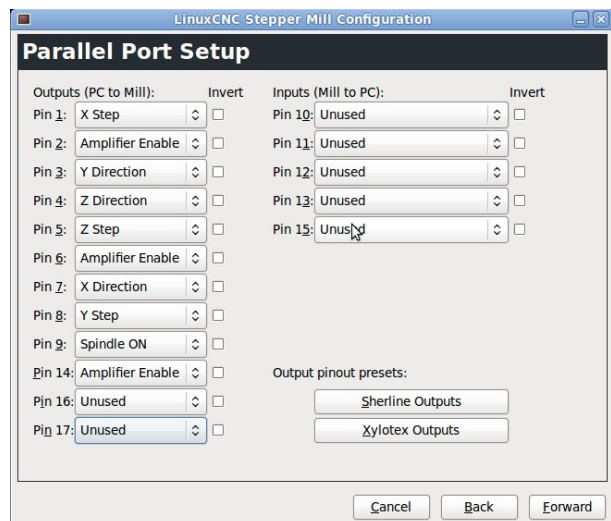


Figura 19. LinuxCNC (Configuración del puerto paralelo)

En la Fig. 19 se muestran las opciones de la pantalla *Parallel Port Setup* (Configuración del puerto paralelo). Aquí es donde se realiza la configuración de cada uno de los pines



del puerto paralelo en relación al driver, esta información se encuentra en el manual de la tarjeta TB6560 (StepperOnline, 2014).

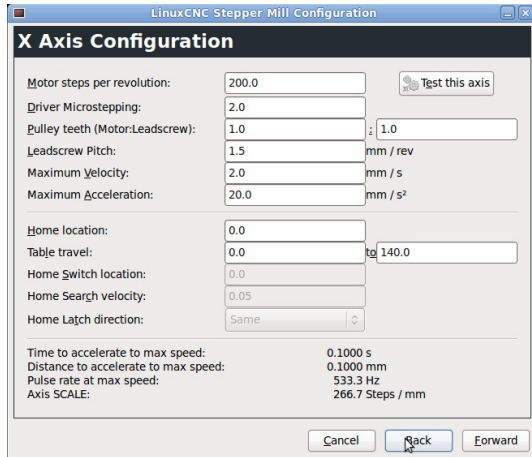


Figura 20. LinuxCNC (Configuración del eje X)

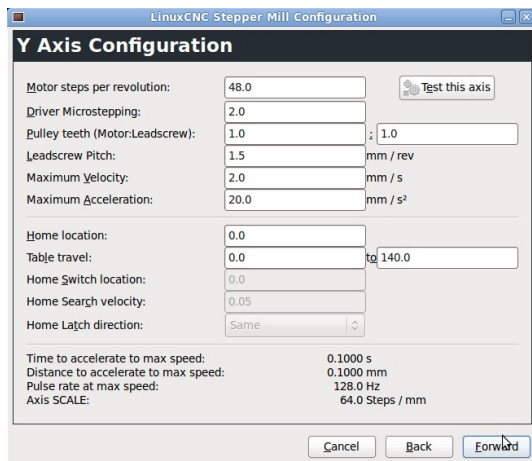


Figura 21. LinuxCNC (Configuración del eje Y)

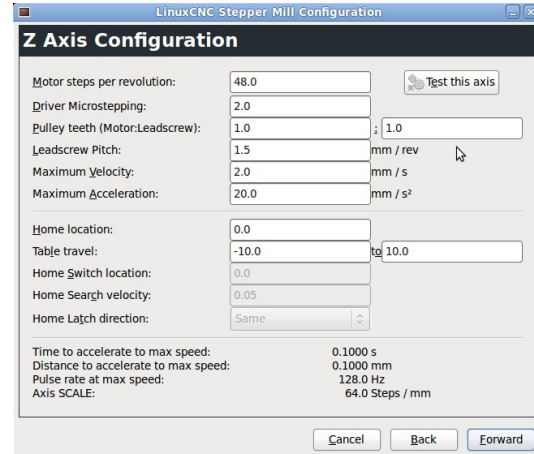


Figura 22. LinuxCNC (Configuración del eje Z)

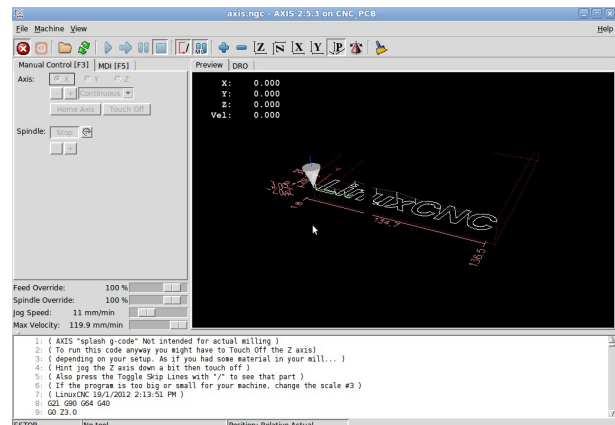


Figura 23. LinuxCNC (Enhanced Machine Controller o EMC2)

### Elección de la herramienta de fresado

Para elegir la mejor maquina-herramienta para la fresadora CNC para elaborar PCB's se tomaron en cuenta diferentes variables. En la tabla 3 y tabla 4 se observan algunas de las opciones de maquina-herramienta mas comunes en el mercado.

La baquelita es un material considerado como blando, por tal razón el trabajo de remoción de material no requiere una potencia muy alta (ecuación 7). Esta potencia puede ser entregada por cualquiera de las máquinas-herramienta descritas anteriormente. Sin embargo, la herramienta de corte necesaria para este prototipo debe presentar otras características básicas para el optimo rendimiento del prototipo y precisión en el material a mecanizar, tales como: versatilidad, confiabilidad, rendimiento, baja oscilación, velocidad, peso y longitud.

Tabla 3

Parte 1 - Características de algunas máquinas-herramienta.

	Chicago Electric	Dremel 200	Dremel 300
Tipo	Rotary Tool	Mototool	Mototool
Tensión nominal [V]	120 AC	230 AC	230 AC
Corriente [A]	0,7	1,2	1,15
Potencia [W]	250	125	125
Velocidad RPM	16000	35000	15000 - 35000
Velocidad variable	NO	NO	SI
Tipo de trabajo	Industrial	Ocasional	Ocasional
Escobillas reemplazables	NO	NO	NO
Sistema de cambio rápido de accesorios	NO	NO	NO
Versatilidad	Regular	Malo	Regular
Rendimiento	Bueno	Regular	Bueno

Tabla 4

Parte 2 - Características de algunas máquinas-herramienta.

	Dremel 3000	Dremel 4000	Zen Toolworks
Tipo	Mototool	Mototool	Motor DC
Tensión nominal [V]	120 AC	120 AC	24 – 36 DC
Corriente [A]	1,2	1,6	0,3
Potencia [W]	130	175	30
Velocidad RPM	5000 - 32000	5000 - 35000	5000 - 8000
Velocidad variable	SI	SI	NO
Tipo de trabajo	Industrial	Industrial	Ocasional
Escobillas reemplazables	SI	SI	NO
Sistema de cambio rápido de accesorios	SI	SI	NO
Versatilidad	Bueno	Excelente	Regular
Rendimiento	Excelente	Excelente	Bueno

Por lo anterior el Dremel 3000, es una herramienta que presenta una buena versatilidad optima para el acoplamiento

con el eje Z del prototipo. Igualmente tiene un excelente rendimiento con velocidades de trabajo variables, las cuales se ajustan a la perfección de acuerdo al material a trabajar, y la vibración de la herramienta durante el periodo de trabajo es muy baja (la menor del conjunto estudiado).

### Trazos de las líneas

Las líneas que unen los puntos de conexión en los circuitos impresos deben cumplir ciertos requisitos mecánicos, eléctricos y estéticos. Desde el punto de vista mecánico, debe tener la medida exacta. Si son muy gruesos, no dejan espacios para otras líneas y puntos de conexión, aumentando sin necesidad el tamaño del circuito impreso (Duque, 2010).

Eléctricamente, su ancho determina la capacidad de corriente que puede conducir. Para circuitos de baja potencia, una línea de 0,1 mm es suficiente en la mayoría de los casos. Si hay partes de circuitos que manejan corrientes altas, se deben utilizar líneas más gruesas. En la tabla 5) se especifican los espesores recomendados según la corriente a manejar por una línea del circuito (Duque, 2010).

Tabla 5

Máxima corriente permitida de acuerdo con la dimensión del trazo.

Máxima corriente permitida	
Ancho de pista (mm)	Corriente (A)
0,12	0,5
0,25	0,8
0,50	1,4
0,75	1,8
1,25	2,2
1,75	3,5
2,50	4
5	6

Otro aspecto a tener en cuenta es que al diseñar las pistas hay que tener presente la longitud, grosor, ángulo de las curvas y máxima corriente que deban conducir. En cualquier caso es recomendable utilizar herramientas de software para determinar y calcular las dimensiones de pistas a usar según parámetros solicitados en el diseño, ya que estas dimensiones, mal definidas, podrán incrementar el valor de una resistencia o antena no deseada y causar problemas por caídas de tensión, ruido o servir de fusible al limitar el paso de corriente (Salas et al., 2007).

### Evaluación de desempeño

En base a las diversas pruebas funcionales realizadas al prototipo, se realizaron mediciones y hallaron algunos valores operativos. Algunos otros parámetros, sin embargo,

no pudieron ser determinados con las medidas por limitaciones instrumentales, tal es el caso del ángulo de rotación de cada eje. En base a lo anterior, se establecieron los siguientes parámetros:

### Análisis de error de la máquina

Para encontrar el error de la máquina en la elaboración de PCB's, se realizaron diferentes mediciones en el grosor de los trazos producidos por la máquina tomando como referencia el grosor de los caminos realizados en el diseño. Para determinar el error, se aplica la ecuación 14

$$E_t = T_m - T_r \quad (14)$$

Donde:

- $E_t$  = Error absoluto de la máquina en un trazo [mm].
- $T_m$  = Valor medido en un trazo [mm].
- $T_r$  = Valor real en un trazo [mm].

En la medición de diferentes tramos del PCB, se obtiene diferentes valores y se aplica la ecuación 15 para determinar el error de posicionamiento de la maquina.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n E_i = E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n} \quad (15)$$

Donde:

- $E_m$  = Error promedio de la máquina [mm].
- $n$  = Número de trazos medidos [mm].

En la Fig. 24 se observa el diseño de una PCB de prueba con el resultado obtenido con el prototipo.

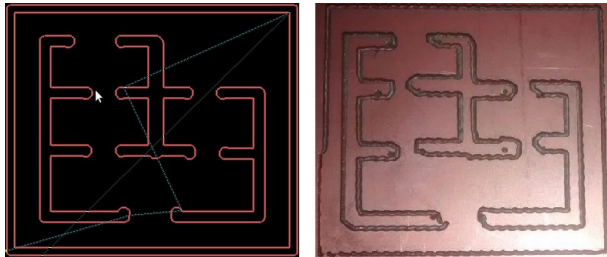


Figura 24. Comparación entre el diseño de una PCB frente al producido por la máquina

Como podemos observar en la Fig. 24, la PCB elaborada por la máquina fresadora tiene trazos con cierto error producidos por factores como son la herramienta de corte, la profundidad en el fresado, el tiempo de trabajo de la máquina, complejidad del diseño, entre otros. Los resultados del análisis de error se puede observar en la tabla 6.

### Parámetros estructura mecánica

Los parámetros descritos en la tabla 6, que corresponden a cada uno de los ejes, no hacen referencia al rango máximo que puede alcanzar el prototipo, tan solo equivalen al

Tabla 6

Resultados funcionales del prototipo.

Parámetro	Cantidad
Error promedio de posicionamiento	0,126 mm
Error máximo de la máquina	0,5 mm
Máxima velocidad de trabajo	90 mm / min
Ancho de corte	0,1 mm
Rango de eje X	0 - 130 mm
Rango de eje Y	0 - 130 mm
Rango de eje Z	-7 - 12 mm

rango para el cual se garantiza un óptimo funcionamiento de la máquina en cuanto a velocidad, torque y error de posicionamiento. Los valores establecidos para los rangos máximos de alcance en cada eje pueden ser mayores solo que, al aumentar estos parámetros, disminuyen sustancialmente otros como: velocidad, torque y error de posicionamiento.

El rango del eje Z es de -7 mm a 12 mm, debido a que se toma como punto de referencia la bandeja donde va asegurada la baquelita.

### Parámetros de los motores

Con respecto a los motores paso de cada eje tenemos:

Tabla 7

Variables de los motores utilizados en el prototipo.

Parámetro	Motor eje X	Motor eje Y	Motor eje Z
Tensión nominal [VDC]	5,5	5,5	5,5
Corriente máxima [A]	0.8	1	0.8
Ángulo de rotación [°/paso]	7,5	1,8	7,5

Los datos plasmados en la tabla 7 fueron medidos con el multimetro digital Fluke 179 y contrastados en la fuente dual Stetch.

### Recomendaciones de uso

El funcionamiento de la máquina fresadora CNC para elaborar PCB's depende del uso adecuado que se le brinde a cada uno de sus equipos y elementos que la conforman.

A continuación se brindan algunas recomendaciones de uso para el óptimo funcionamiento del prototipo.

**Motores paso a paso.** Los motores paso a paso utilizados en la construcción del prototipo, tienen un voltaje nominal dado por el fabricante de 5 VDC. Al ser sometidos a pruebas de funcionamiento, se determinó que la tensión en los bornes de entrada ideal para obtener un óptimo funcionamiento de cada motor es de 5.5 VDC. Al someter los motores a un nivel de tensión mayor a 5.5 VDC, ocasionará el calentamiento de los motores y así mismo, la reducción de su vida útil.

Sin embargo, si se requiere un mayor torque en los motores, los conductores de los comunes de las bobinas de cada motor deben de ir unidos entre sí, de lo contrario pueden dejarse libres entre sí.

**Máquina de corte.** El Dremel 3000, usado como herramienta de corte, tiene velocidades variables para ajustar de acuerdo al trabajo a realizar. Es recomendable no dejar en una alta velocidad por tiempos prolongados esta máquina ya que ocasionaría el calentamiento excesivo de la herramienta, afectando los devanados y aislamiento de cada una de sus bobinas, y causando de esta manera la disminución en la eficiencia de la herramienta.

**Fresa o herramienta de corte.** Se recomienda el uso de una fresa de carburo con aleación de tungsteno para la labor de corte y remoción del material de la baquelita. La profundidad del corte depende del diámetro de la punta de la broca o fresa, porque una fresa con una punta muy fina, a una profundidad muy grande, causara daños en la misma que la dejaría prácticamente obsoleta, incluso después de su primer uso. Por esto es aconsejable que la profundidad del corte sea aproximadamente igual al diámetro de la punta de la herramienta o que no sobre pase considerablemente su diámetro. Esto también incide en la calidad del PCB, dado que estas fresas normalmente vienen en ángulos, lo que implica que una mayor profundidad de perforación implica mayor ancho de perforación.

Por último, se incluye en la Fig. 25 y la Fig. 26 las fotografías de la máquina en el proceso de la elaboración del PCB; en la Fig. 27 y la Fig. 28 se incluye las fotografías de unos diseños de PCB's elaborados con el prototipo.

### Conclusiones

El desarrollo del proyecto entregó como resultado un prototipo con tres ejes ortogonales movidos cada uno por un motor paso a paso. Los motores son controlados a través del puerto paralelo de un sistema operativo en tiempo real, en este caso RT-Linux CNC. El software de manipulación y manejo procesa el formato de coordenadas en códigos Gerber. Primero se crea el circuito en cualquier software de diseño CAD, y luego es pasado a formato Gerber. En este caso el circuito es diseñado en Eagle. La interfaz entre la estructura mecánica del prototipo y el software es una tarjeta

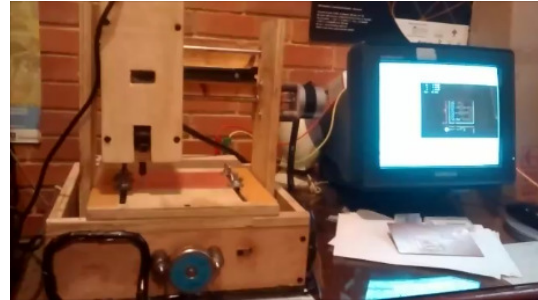


Figura 25. Parte 1 - Máquina fresadora CNC elaborando una PCB



Figura 26. Parte 2 - Máquina fresadora CNC elaborando una PCB

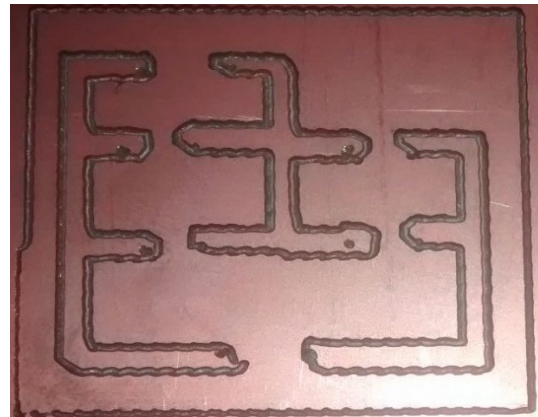


Figura 27. Parte 1 - Circuito impreso realizado por la máquina fresadora

driver de potencia dimensionada para manejar hasta nueve ejes.

En el desarrollo del prototipo se realizó una exhaustiva investigación sobre las herramientas necesarias en la construcción de la máquina fresadora CNC para la elaboración de PCB's, en las cuales se eligieron las opciones mas viables para el prototipo. Primero, se desarrolló los diseños de la estructura mecánica de cada uno de los ejes que conformarían la máquina. Luego, se hizo la adquisición de

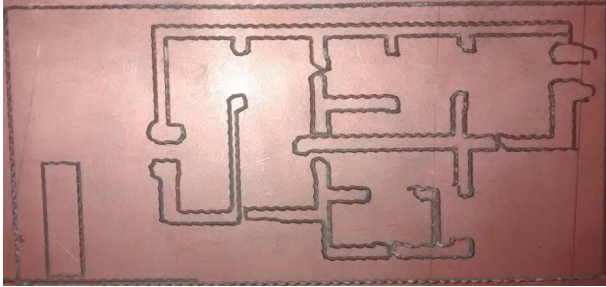


Figura 28. Parte 2 - Circuito impreso realizado por la máquina fresadora

los materiales como fueron los motores, la tarjeta de potencia y de todos los equipos necesarios en la implementación del prototipo. Con la estructura mecánica finalizada, se implementó las herramientas del control computarizado y de todos los software para el funcionamiento de la fresadora. El comportamiento del prototipo de máquina fresadora CNC es el adecuado para realizar el fresado de la baquelita para fabricar circuitos impresos de una cara, esto fue evaluado en laboratorio a través de un gran número de pruebas. Las dimensiones máximas de un circuito impreso que puede realizar el sistema es de 13 cm × 13 cm y supera las dimensiones planteadas inicialmente de 10 cm × 10 cm.

## Referencias

- Abdul-Ameer, H., Al-kind, G., y Zughaer, H. (2011). Towards computer vision feedback for enhanced cnc machining. En *Ieee 3rd international conference on communication software and networks (iccsn)*.
- Acuna, F., Gordon, A., y Nunez, W. (2013). Design and implementation of a prototype lathe milling of computer numerical control. En *Ii international congress of engineering mechatronics and automation (ciima)*.
- Alciro.org. (2010). Plotter router fresadora cnc. En (cap. 5). [www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC1](http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC1).
- Breaz, R., y Racz, G. (2012). Motion control of medium size cnc machine-tools-a hands-on approach. En *7th ieee conference on industrial electronics and applications (iciea)*.
- Cadence.com. (2015, Febrero). *Oficial page of cadence orcad*. Descargado de <http://www.cadence.com/us/Pages/default.aspx>
- CadsoftUSA.com. (2015, Febrero). *Oficial page of cadsoft*. Descargado de <http://www.cadsoftusa.com/>
- Cubides, H. H. R., y Heredia, L. C. S. (2013). Prototipo de maquinado para fabricación de circuitos impresos con fresadora. En *Tercer congreso virtual microcontroladores y sus aplicaciones*.
- Dremel. (s.f.). Instrucciones de funcionamiento y seguridad, dremel 3000. [Manual de software informático].
- Duque, E. (2010). *Curso práctico de electrónica moderna*. Universidad Tecnológica de Pereira. Descargado de <http://www.utp.edu.co/~eduque/Introduccion/Impresos%20manual.pdf>
- Elias, D., Yusof, Y., y Minhat, M. (2013). Cnc machine system via step-nc data model and lab view platform for milling operation. En *Ieee conference on open systems (icos)*.
- Erwinski, K., Paprocki, M., Lech, M., Karwowski, K., y Wawrzak, A. (2013). Application of ethernet powerlink for communication in a linux rtai open cnc system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60, 628 - 636.
- INC, A. E. M. (2008). Sm series stepper motors [Manual de software informático].
- Johnson, J. (2013). The pcb-gcode user's manual [Manual de software informático]. [pcb-gcode.org](http://pcb-gcode.org).
- Khanna, A., Kumar, A., Bhatnagar, A., y Tyagi, R. a. m. a. (2013). Low-cost production cnc system. En *7th international conference on intelligent systems and control (isco)*.
- Labcenterelectronics.com. (2015, Febrero). *Oficial page of labcenter electronics*. Descargado de <http://www.labcenter.com/index.cfm>
- Linuxcnc.org. (2014, Abril). *Home of users of linuxcnc*. Descargado de <http://www.linuxcnc.org/index.php/english/about>
- Lopez, A., Ortiz, E., Padilla, G., y Tabares, H. (2013, Septiembre). *Diseño y manufactura de prototipo de fresadora vertical cnc* (Inf. Téc.). Instituto Politecnico Nacional, Mexico.
- NationalInstruments.com. (2015, Febrero). *Página de national instruments-colombia*. Descargado de <http://colombia.ni.com/>
- Novoa, K. (2002). Circuitos impresos, aplicaciones y algunas experiencias. *Tecnura*, 6(11), 18-26.
- Ping, B., Jiangang, L., y Liang, H. (2012). A general motion simulation sescription of multi-axis cnc machine tools. En *31st chinese control conference (ccc)*.
- Salas, R., Pérez, J., y Ramírez, J. (2007). *Técnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos impresos*. Universidad de los Andes. Venezuela.
- Silva, H. (2008). *Desarrollo de un sistema de control para una micromaquina herramienta basada en código estandar para cnc*. Tesis de Master no publicada, Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- SketchUp.com. (2015, Abril). *Página de sketchup en español*. Descargado de <http://www.sketchup.com/es>

StepperOnline. (2014). *3-axis tb6560 cnc driver board users manual*. StepperOnline.com.

Yeh, S., y Sun, J. (2012). Design of perfectly matched zero-phase error tracking control for multi-axis motion control systems. En *Sice annual conference*.

Yeh, S. S., y Hsu, P. L. (2003). Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(3), 375-382.



# Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales

*Estimation of flows in the middle basin of the Magdalena River using the method of flow transposition*

Eduardo Zamudio H.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
fgonzalezc@udistrital.edu.co

Laura M. Moreno S.  
Interdico  
lmmorenos@correo.udistrital.edu.co

Fredy D. Duitama R.  
Sedam Consultores  
fdduitamar@correo.udistrital.edu.co

---

Esta investigación plantea modelos que permiten obtener información del cauce sin programas de medición, de una forma rápida y eficiente asociado a los datos obtenidos entre diferentes estaciones hidrológicas suministradas por el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para transferir datos mensuales o diarios de caudal de un sitio aforado a uno sin aforar, lo cual permite generar y calibrar un modelo de equilibrio hidrológico sin la necesidad de implementar nuevas estaciones en los puntos sin aforo, con base en las áreas de drenaje.

*Palabras clave:* Caudal, estimación, transposición de caudal

This research propose models to get information of the channel without programs of measuring, quickly and efficiently associate data obtained from different hydrological stations supplied by the Institute of Hydrology and Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), for transfer monthly or daily streamflow data from a place with information to another that does not have it, allowing generate and calibrate a balance hidrological model without the necessity of implement new stations on the point which does not have the information, based on drainage areas.

*Keywords:* Estimation, Flow, flow transposition

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Duitama, F., Moreno, L. y Zamudio, E. (2015). *Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales*. Revista Tekhnê, 12(1), 39-48.

## Introducción

Según la procuraduría delegada para asuntos ambientales y agrarios se describe lo siguiente respecto al Río Magdalena el cual *es conocido como la principal arteria fluvial de Colombia, debido a que comprende el 49% de la población colombiana, contempla una dinámica social, económica y ambiental en torno al territorio que lo rodea; además por su gran caudal circundante* (Procuraduría, 2013). Dada las potencialidades de la cuenca, los asentamientos humanos se han establecido en las periferias causando un impacto ambiental, que incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones y genera amenazas de desastres naturales. Además, se muestra la falta de planeación, como lo indica la procuraduría general de la nación en la publicación: Río Magdalena Informe social, económico y ambiental del día 18 de octubre de 2013:

*... la procuraduría ha identificado la existencia de planes y programas, de nivel central y territorial, que han encaminado esfuerzos para afrontar algunas problemáticas identificadas al interior de la cuenca, pero no han repercutido en una escala mayor, debido a que los esfuerzos son aislados, no coordinados y discontinuos en el tiempo...*

Motivo por el cual el semillero de investigación UDENS, adscrito a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, promueve los proyectos de investigación en pro de la gestión de recursos de agua en la cuenca media del Río Magdalena. Para tal fin se desarrolla un proyecto de recursos hídricos que plantea modelos que permiten obtener información del cauce sin programas de medición, de una forma rápida y eficiente asociado a los datos obtenidos entre diferentes estaciones hidrológicas suministradas por el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para transferir datos mensuales o diarios de caudal de un sitio aforado a uno sin aforar, lo cual permite generar y calibrar un modelo de equilibrio hidrológico sin la necesidad de implementar nuevas estaciones en los puntos sin aforo.

La investigación que se desarrolla se basa en la importancia de establecer caudales en la cuenca media del Río Magdalena, en primera instancia para la planificación de proyectos de abastecimiento de agua con distintos fines. Esto se hace necesario tanto en su diseño como para la seguridad de los mismos sistemas, en la planificación del uso de la tierra, es importante para realizar balances hídricos y determinar la disponibilidad del agua. Además, en los proyectos hidroeléctricos son imprescindibles estos datos, ya que sin el pleno conocimiento de la disponibilidad de agua, no es posible realizar diseños de embalses, establecer problemáticas de sedimentos tanto en diseño como en ejecución de obras para mejoramiento de cuencas.

Para poder simular el comportamiento del cauce, el desarrollo de modelos matemáticos y físicos son de gran importancia, dado que al modelar ciertos fenómenos naturales se pueden crear ecuaciones para predecir su comportamiento. Por lo tanto, la presente investigación consiste en la construcción de un modelo basado en la aplicación de los métodos de transferencia de caudales (Mohamoud y Parmar, 2006), en función del área de drenaje de las estaciones disponibles en la red hidrológica, y los puntos donde no se cuente con estaciones de aforo. Partiendo de las ecuaciones convencionales que se aplican en variedad de canales, tales como la ecuación de Manning y las de transferencia de caudales, se hace necesario precisar la efectividad de estas al momento de implementarlas en un espacio geográfico determinado, como lo es la cuenca media del Río Magdalena, donde se aplica la metodología de las ecuaciones de transferencia empleadas en la investigación desarrollada en la región del medio atlántico EE.UU. estudiadas por Yusuf M. Mohamoud y Rajbir S. Parmar para determinación de caudales, con el fin de verificar si este método puede ser aplicado en la cuenca a estudio.

La zona a estudio se limita a la región comprendida desde Honda hasta el Banco (IDEAM-CORMAGDALENA, 2001), con información de doce estaciones hidrológicas distribuidas en la cuenca, suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales): Arrancaplumas (2123702), Puerto Salgar (2303701), La Vega (2403712), San Rafael (2403709), La Resaca (2403711), El Molino (2403745), Puerto Colonial (2403730), San Gil (2402701), Guican (2403704), Puente Llano (2402705), Puente la Paz (2406703) y Café Madrid (2319729), con las cuales se plantea el modelo de transferencia de caudales para puntos de control que no cuentan con estaciones de aforo en la región. Los resultados obtenidos demuestran un buen comportamiento para sub-cuencas con características fisiográficas similares, que son analizadas mediante los hidrogramas de caudal específico, con lo cual se evidencia que no es imprescindible su ubicación geográfica en el mismo afluente para poder emplear el método de transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena.

## Desarrollo del método de transposición de caudales en la cuenca media del Río Magdalena

### Procedimiento metodológico

Para el desarrollo de la propuesta se aplica la metodología de una investigación experimental dado que su objetivo es explicar la relación entre dos o más variables, donde se modifica intencionalmente el estado de la variable independiente que se desea evaluar, al tomar dos grupos de estudio uno experimental y otro de control.



La información será analizada por medio de un estudio exploratorio de los datos, con el objeto de determinar las ecuaciones de transferencias de caudales para cada una de las estaciones, con base en información suministrada por el IDEAM, la cual será validada por parámetros estadísticos, donde se realizarán regresiones de tipo lineal y potencial que predicen el comportamiento hidrológico de las cuencas y serán validadas por medio de correlaciones estadísticas e hidrológicas de  $t$  (Tiempo) y  $F$  (Frecuencia).

El método a emplear de transferencia de caudales mensuales y diarios en las zonas no medidas por estaciones hidrológicas es el siguiente:

- Localización geográfica de las 12 estaciones hidrológicas tomadas para el presente estudio dentro de la cuenca media del Río Magdalena.
- Cálculo de las ecuaciones de transferencia de caudales entre las distintas estaciones, al suponer datos no conocidos en alguna de ellas.
- Validación de la información por medio de coeficientes de correlación para caudales medios y coeficiente de NSE para caudales medios diarios.
- Limitar las ecuaciones de transferencia de caudales en función del área de drenaje.

Logrando así obtener la información en donde la red hidrométrica no cuenta con puntos de control.

### Identificación y descripción de las estaciones a estudio

La información corresponde a los caudales mensuales máximos, medios, mínimos y medios diarios desde el año 1934 hasta el 2013, de doce estaciones hidrológicas distribuidas en la cuenca a estudio como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Resumen de las estaciones hidrológicas.

ESTACIONES HIDROLÓGICAS									
No.	CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ÁREA DE DRENAJE (km <sup>2</sup> )	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (m.s.n.m)	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	CORRIENTE
1	2123702	Arancaplumas	54.359	5°12' N	74°43' W	203	TOLIMA	HONDA	MAGDALENA
2	2303701	Puerto Salgar	56.905	5°28' N	74°38' W	172	CUNDINAMARCA	PUERTO SALGAR	MAGDALENA
3	2403712	La Vega	287	5°35' N	72°59' W	2575	BOYACÁ	CUITIVA	IZA
4	2403709	San Rafael	347	5°42' N	73°14' W	2500	BOYACÁ	TUTA	CHULO
5	2403711	La resaca	557	5°40' N	75°59' W	2520	BOYACÁ	PIRAVTOBA	CHUQUITO
6	2403745	El Molino	54	5°43' N	73°07' W	2539	BOYACÁ	PAIPA	SALTIRE
7	2403730	Puerto Colonial	47	5°43' N	72°50' W	2909	BOYACÁ	MONGUI	MONGUI
8	2402701	San Gil	1.849	6°32' N	73°07' W	1113	SANTANDER	SAN GIL	FONCE
9	2403704	Guicán	138	6°27' N	72°25' W	2600	BOYACÁ	GUICÁN	NEVADO
10	2402705	Pie llano	199	6°17' N	73°07' W	1400	SANTANDER	CHARALA	TÁQUIZA
11	2406703	Pie la paz	21.513	7°06' N	73°25' W	239	SANTANDER	BETULIA	SOGAMOSO
12	2319729	Café Madrid	2.148	7°09' N	73°08' W	600	SANTANDER	GIRÓN	LEBRUJA

### Resumen de los caudales mensuales y diarios y descripción del cálculo de hidrogramas de caudal específico

Con base en la información se presenta el promedio aritmético de los caudales mensuales multianuales para cada una de las estaciones en función de: el tiempo, área de drenaje y clasificación del flujo (Máximo, medio, mínimo y medios diarios).

Luego de elaborar las gráficas de los caudales multianuales, se procede a calcular los hidrogramas de caudal específico para cada uno de los cuatro casos a estudio: mínimos, medios y máximos mensuales, y medios diarios respectivamente. Para poder elaborar esta gráfica, se procede a hallar un caudal específico donde se divide el valor del caudal promedio multianual hallado, sobre el área de la estación a estudio.

### Estimación de caudales mensuales y diarios usando el método de transferencia

Este método se emplea principalmente con parámetros adimensionales que tengan variables a transferir, lo cual está determinado principalmente por relaciones que incluyen la escurrentía y el área de la cuenca. Este método transfiere información y genera una relación entre el área, caudales y precipitaciones de la cuenca. Se aplica en cuencas donde se tenga información conocida y en zonas donde no se cuente con estos datos, las relaciones son las mostradas en la Ecu. 1 (Esquivel et al., 2013).

$$\frac{Q_c}{A_c P_c} = \frac{Q_s}{A_s P_s} \quad (1)$$

Al considerar que las precipitaciones son homogéneas dentro de la misma cuenca, se obtiene la Ecu. 2.

$$Q_s = Q_c \left( \frac{A_s}{A_c} \right)^n \quad (2)$$

Donde:

- $Q_s$  = caudal de la cuenca sin información (m<sup>3</sup>/s).
- $Q_c$  = caudal de la cuenca con información (m<sup>3</sup>/s).
- $A_s$  = Área de la cuenca sin información (km<sup>2</sup>)
- $A_c$  = Área de la cuenca con información (km<sup>2</sup>)
- $n$  = Coeficiente de calibración para el caso general

corresponde a 1.

Complementando la información con otras ecuaciones que también son aplicables en los métodos de transferencia, en donde no se tiene en cuenta los datos de precipitación (Ecu. 3, 4 y 5).

$$Q_u = Q_g \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (3)$$

$$Q_u = Q_g \arctan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (4)$$

$$Q_u = Q_g \tan \left( \frac{A_u}{A_g} \right) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que las Ecu. 3, 4 y 5 corresponden a los modelos hidrológicos tradicionales y que la Ecu. 2 complementa la ecuación Ecu. 3, al considerar un exponente  $n$  en la relación de áreas.

$$Q_s = Q_c \times \left(\frac{A_s}{A_c}\right)^n \quad (6)$$

Y empleando logaritmo natural en ambos lados de la expresión se obtiene el coeficiente  $n$ :

$$n = \frac{\ln\left(\frac{Q_s}{Q_c}\right)}{\ln\left(\frac{A_s}{A_c}\right)} \quad (7)$$

Con base en las ecuaciones se emplea el siguiente procedimiento para cada una de las estaciones:

1. Seleccionar una de las estaciones (tabla 1), que se considere como estación conocida.
2. Ubicar la red de estaciones hidrológicas en planimetría e identificar la estación a estudio.
3. Identificar una segunda estación (tabla 1), distinta a la conocida y determinar, el coeficiente  $n$ , con la Ecu. 7.
4. Suponer que no se dispone del volumen de agua por unidad de tiempo en la segunda estación.
5. Interpolarse el caudal de la estación desconocida por medio de las Ecu. 2, 3, 4 y 5 con base en los datos de la estación conocida.
6. Calcular el error relativo y el coeficiente de correlación lineal para los caudales mensuales y coeficientes de correlación de Nash Sutcliffe para caudales diarios.

### Matriz de resumen para los exponentes $n$ y los coeficientes de correlación

De modo análogo al numeral anterior, se desarrollan en las demás estaciones el procedimiento, exponentes para la Ecu. 2, los coeficientes de correlación lineal para los caudales: mínimos, medios y máximos mensuales, y el coeficiente NSE para caudales medios diarios (tabla 2).

Tabla 2  
Diagrama explicativo para matriz de resumen de  $n$ .

RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"												
CAUDALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar	ZONA I						ZONA II					
La Vega												
San Rafael												
La resaca												
El Molino												
Puerto Colonial												
San Gil	ZONA IV						ZONA III					
Gulcan												
Pte llano												
Pte la paz												
Café Madrid												

La tabla 2 sectoriza las estaciones en 4 zonas, relacionadas con su ubicación geográfica, donde:

- Zona I: Corresponde a las estaciones Arrancaplumas y Puerto Salgar pertenecientes a la cuenca media del Río Magdalena, y que pertenecen al afluente principal.
- Zona II: Transferencia de caudales de la Zona I hacia las demás estaciones que no pertenecen al afluente principal, es decir, las estaciones pertenecientes a la Zona IV.

- Zona III: Corresponde a las estaciones pertenecientes a la cuenca media del Magdalena-Cauca y pertenecientes a las corrientes de: Iza, Chulo, Chiquito, Salitre, Mongiui, Fonce, Nevado, Taquiza, Sogamoso y Lebrija.
- Zona IV: Transferencia de caudales de la Zona III hacia las estaciones de la Zona I.

Para la lectura apropiada de la matriz del coeficiente de correlación lineal o de Nash (tabla 3) se recomienda seguir los siguientes pasos:

Tabla 3  
Diagrama explicativo para tabla de resumen del coeficientes de correlación.

RESUMEN DE COEFICIENTE DE CORRELACION												
CAUDALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar												
La Vega												
San Rafael												
La resaca												
El Molino												
Puerto Colonial												
San Gil												
Gulcan												
Pte llano												
Pte la paz												
Café Madrid												

TABLA DE VALOR- COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL	
	Excelente
	Buena
	Aceptable
	Regular
	Inaceptable

1. Su lectura se realiza de izquierda a derecha, y de abajo hacia arriba como se indica con las flechas en la tabla.

2. El valor determinado al interceptar la fila y la columna es único para cada celda, de tal modo que para conocer el coeficiente de un valor siempre tiene que hacerse del modo expreso en el paso 1.

3. La tabla de valor indica un rango de cinco colores, los cuales indican que tan confiable es la transposición de una estación a otra, en función del coeficiente de correlación lineal para caudales mensuales y el coeficiente de NSE (*Nash Sutcliffe Efficiency*) para caudales medios diarios.

En las tablas 4 a 11 se resumen los coeficientes  $n$  calculados mediante el procedimiento expuesto con anterioridad y sus coeficientes de correlación con los datos suministrados por el IDEAM, al realizar la transferencia de caudales de una estación a otra.

Tabla 4  
Matriz resumen del coeficiente  $n$  para caudales mínimos mensuales.

RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"												
CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar	4.66											
La Vega	1.58	1.61										
San Rafael	1.48	1.51	4.20									
La resaca	1.66	1.69	0.99	-0.30								
El Molino	1.33	1.37	0.64	1.01	0.74							
Puerto Colonial	1.13	1.15	-0.18	0.24	0.13	-10.09						
San Gil	0.85	0.90	2.90	2.73	3.90	1.83	1.38					
Gulcan	0.96	0.99	-3.45	-1.87	-1.34	3.83	2.04	1.11				
Pte llano	0.72	0.75	-11.66	-6.21	-3.49	4.08	2.72	0.52	4.71			
Pte la paz	1.39	1.51	1.62	1.51	1.73	1.35	1.09	0.69	0.89	0.60		
Café Madrid	1.34	1.39	1.96	1.73	2.44	1.36	0.95	-9.75	0.52	-0.13	1.33	



## Análisis de resultados y conclusiones

Dentro de los factores característicos que se tomaron en cuenta en el proyecto, solo se incluyen en el modelo matemático el área y el caudal de cada estación aforada. Se recomienda para futuros proyectos de investigación generar modelos que incluyan factores como la precipitación, intensidad de lluvias, aspectos climatológicos y las características geomorfológicas de la cuenca, de tal forma que cada una de estas consideraciones se incluya como un coeficiente que altere las ecuaciones del modelo, y de esta forma lograr ver disminuido el porcentaje de incertidumbre que genera la predicción de caudales.

Al realizar un análisis del hidrograma de caudal específico, se puede observar que la estación de puente colonial, no concuerda con ninguna otra estación aforada, ya que las crecientes de caudal se observan en un periodo entre mayo y agosto, lo cual no es muy confiable, puesto que a nivel general las mayores precipitaciones anuales se presentan en los meses de abril a junio y septiembre a noviembre. A raíz de esta incertidumbre, se presenta la inquietud al IDEAM, a lo cual dieron como respuesta ser una entidad capacitada para certificar la dinámica hídrica de los ríos, aunque aclaran que el uso de navegadores no tienen la precisión adecuada o requerida para algunos proyectos. Adicional a ello, si en el estudio se consideran datos muy antiguos, la precisión de los navegadores estaba supeditada al avance tecnológico de la época.

Al emplear el modelo de transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena delimitada por las estaciones a estudio, es necesario que los hidrogramas de caudal específico, tengan cierta homogeneidad, debido a que su comportamiento tiene una influencia implícita con sus características fisiográficas y climáticas. En caso contrario se afecta el modelo de transferencia, como se observa en la estación Puente Colonial (1400 msnm) que tiene un comportamiento atípico, respecto a las demás estaciones, donde al realizar la transferencia de caudales con la Ecu. 2 y con los exponentes obtenidos se tiene un coeficiente de correlación lineal promedio de  $r^2 = 0.20$  para caudales mensuales, lo que indica que los caudales simulados no presentan una correlación directa con ninguna de las estaciones. Además, al calcular el coeficiente de Nash NSE = -6.99 para caudales medios diarios, indica que la media de los datos observados son mejores que los calculados (Fig. 1).

En conclusión, el método de transferencia de caudales puede ser empleado en la cuenca media del Río Magdalena, siempre y cuando las estaciones tomadas para realizar la transferencia de caudales, tengan unos diagramas de caudal específico con cierta similitud. Además, se debe considerar el comportamiento de las funciones predictoras determinadas mediante el coeficiente  $n$ , lo anterior con el fin de obtener unos buenos resultados al emplear el método de la transferencia de caudales.

Con base en los resultados de las tablas 4 a 11, se agrupan las estaciones en función del comportamiento de los coeficientes de correlación lineal en los caudales mensuales, y el coeficiente de correlación de Nash Sutcliffe Efficient en los caudales medios diarios, al realizar la transferencia de caudales de una estación a otra (tabla 12).

Al comparar el coeficiente de NSE con el coeficiente de correlación de lineal  $r^2$ , se observa que el coeficiente  $r^2$  indica un buen comportamiento, pero al observar la Fig. 1 se demuestra que dicho parámetro no es determinante al realizar la transferencia de caudales, en vista que sus hidrogramas de caudal específico no tienen similitud, en contraste con el coeficiente de correlación de NASH, el cual muestra una relación de transferencia de caudales más ajustada a la realidad, ya que los datos negativos indican que no existe una buena correlación (Figs. 2 y 3).

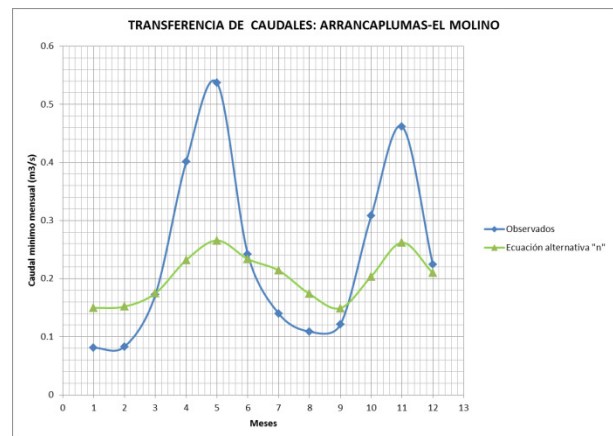


Figura 2. Transferencia de caudales mensuales.

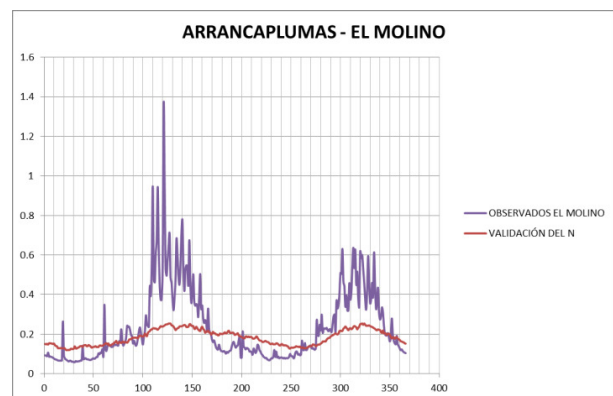


Figura 3. Transferencia de caudales diarios.

Con base en los coeficientes de correlación de NASH, se clasifican las estaciones a estudio en tres grupos, teniendo como parámetro un NSE mayor o igual a 0,50 (Figs. 4, 5 y 6).

Según las figuras, se evidencia que no es posible definir un rango de similitud para los diagramas de caudal

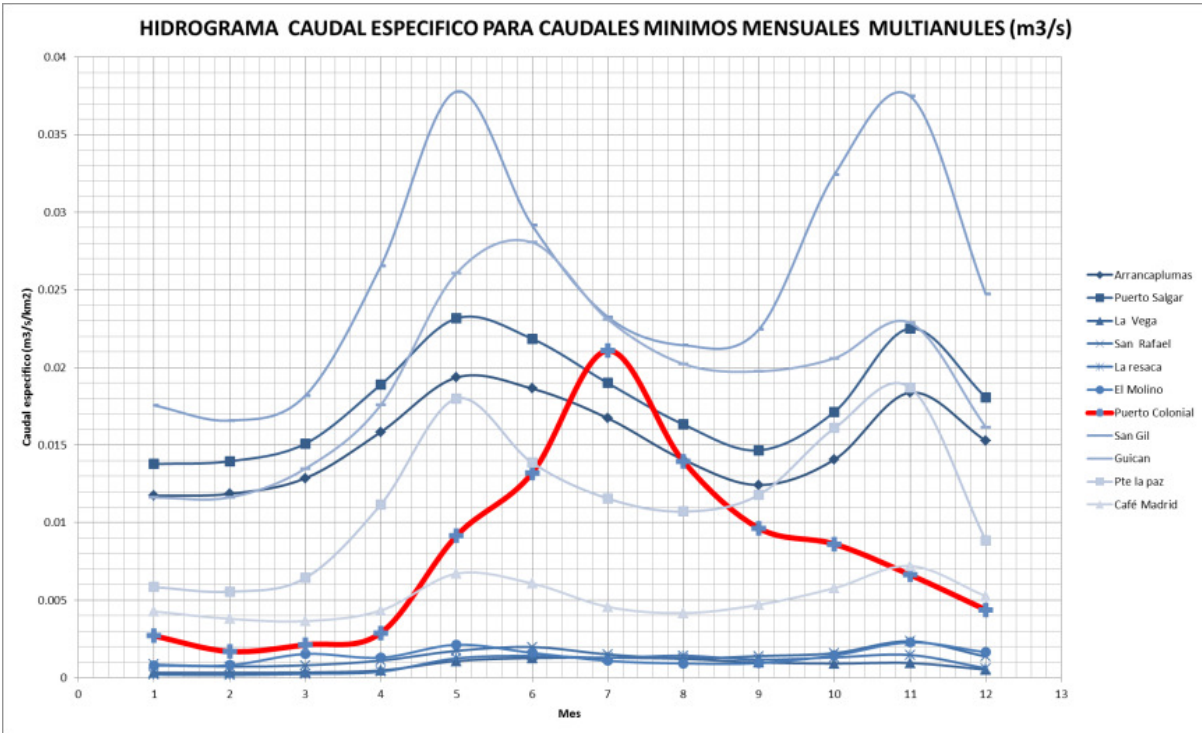


Figura 1. Hidrogramas caudal específico para caudales mínimos mensuales multianuales.

Tabla 12

Agrupación por coeficientes de correlación.

COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE NSE					
Grupo	Estaciones	Coeficiente de correlación			Coeficiente NSE
		Caudal máximo mensual	Caudal medio mensual	Caudal mínimo mensual	Caudal medio diario
Grupo A	Arrancaplumas y Puerto Salgar	0.98	0.99	0.99	0.98 a 0.99
Grupo B	La Vega, La Resaca y San Rafael	0.31 a 0.93	0.59 a 0.95	0.51 a 0.90	0.11 a 0.84
Grupo C	San Gil, Puente Llano, Puente la Paz y Café Madrid	0.70 a 0.94	0.78 a 0.95	0.67 a 0.92	0.23 a 0.91

específico, debido a que la aplicación del método no depende directamente del hidrograma, dado que la ubicación de las estaciones se encuentran distribuidas en diferentes afluentes de la cuenca Media del Río Magdalena, lo cual se ve reflejado en la variación del caudal normalizado y no permite estandarizar un rango. Sin embargo, se encuentra cierta semejanza gráfica y la agrupación de las estaciones tiene una cercanía regional.

La Fig. 7 presenta el flujograma de procesos, el cual está enfocado en facilitar el desarrollo paso a paso de la aplicación del modelo matemático para la transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena.

### Referencias

Esquivel, G., Sánchez, I., Velásquez, M., López, A., López, R., y Bueno, P. (2013). Modelación del escurrimiento

en una subcuenca del trópico húmedo de México y su análisis mediante índices de eficiencia predictiva. *Agrofaz*, 13(2), 113-118.

IDEAM-CORMAGDALENA. (2001). *Estudio ambiental de la cuenca magdalena - cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. (Convenio 003 de 1999)

Mohamoud, Y., y Parmar, R. (2006). Estimating streamflow and associated hydraulic geometry, the mid-atlantic region, usa. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 755-768.

Procuraduría. (2013). *Río magdalena: Informe social, económico y ambiental*. (PROCURADURIA DELEGADA PARA ASUNTOS AMBIENTALES Y AGRARIOS)

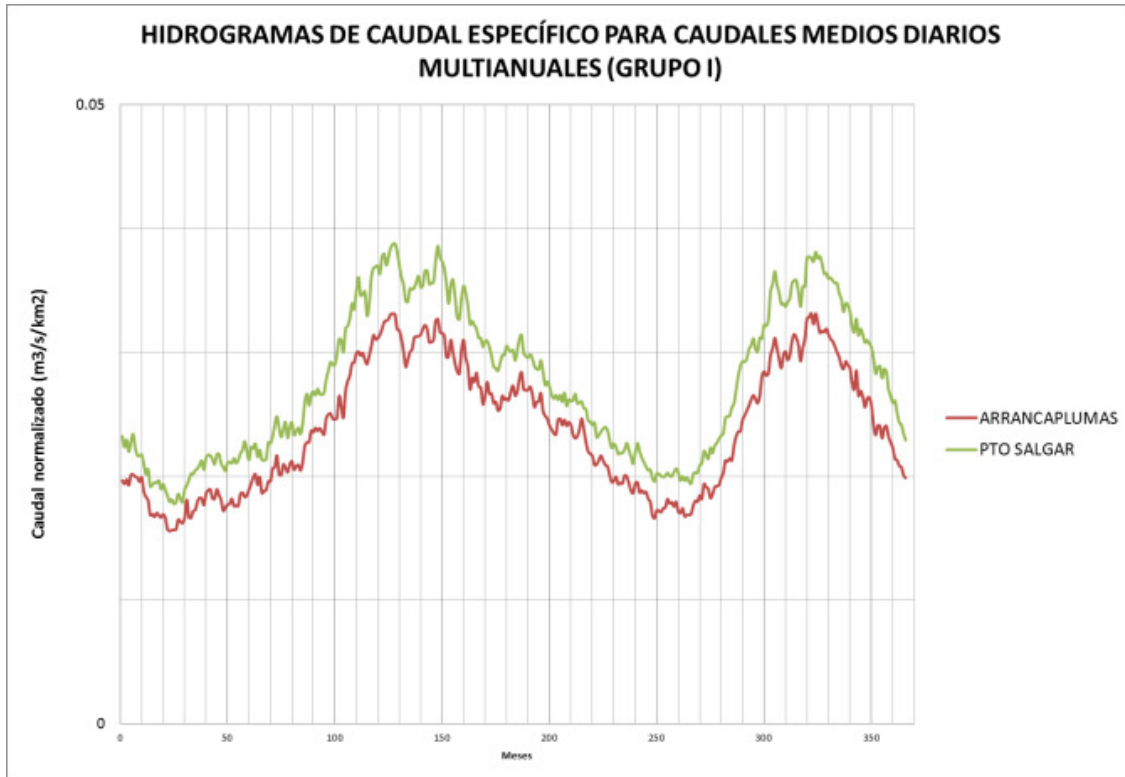


Figura 4. Homogeneidad de caudales (Grupo I).

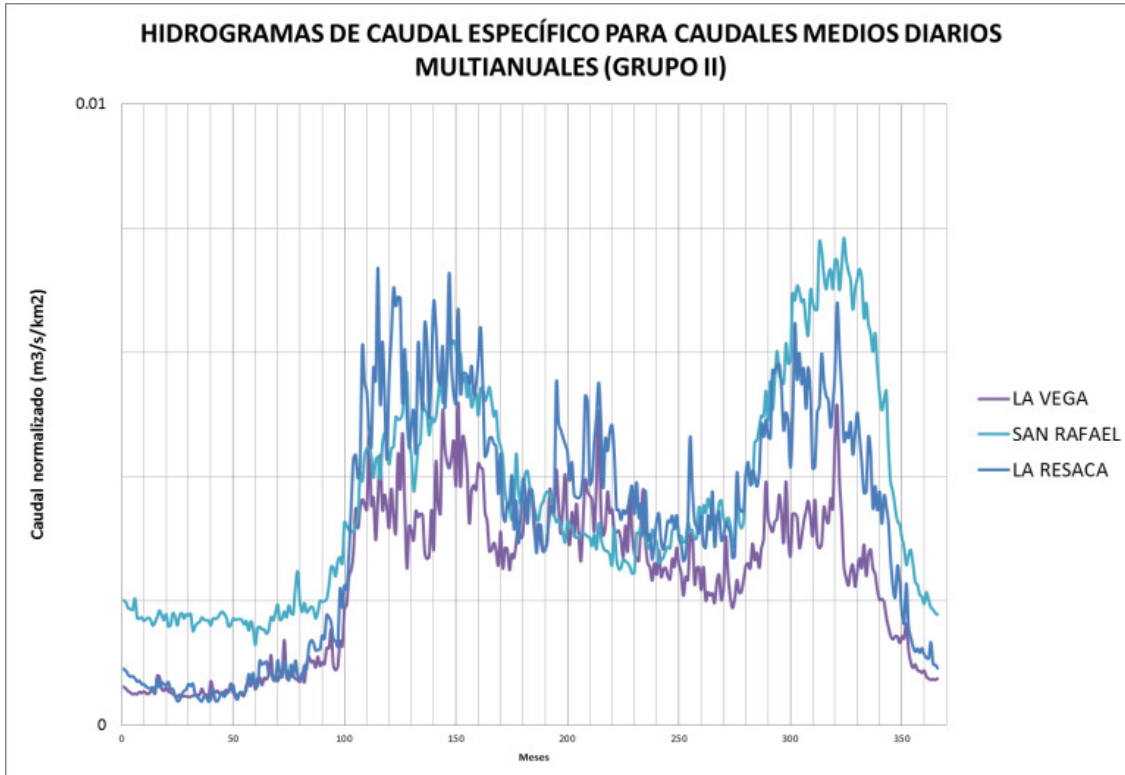


Figura 5. Homogeneidad de caudales (Grupo II).

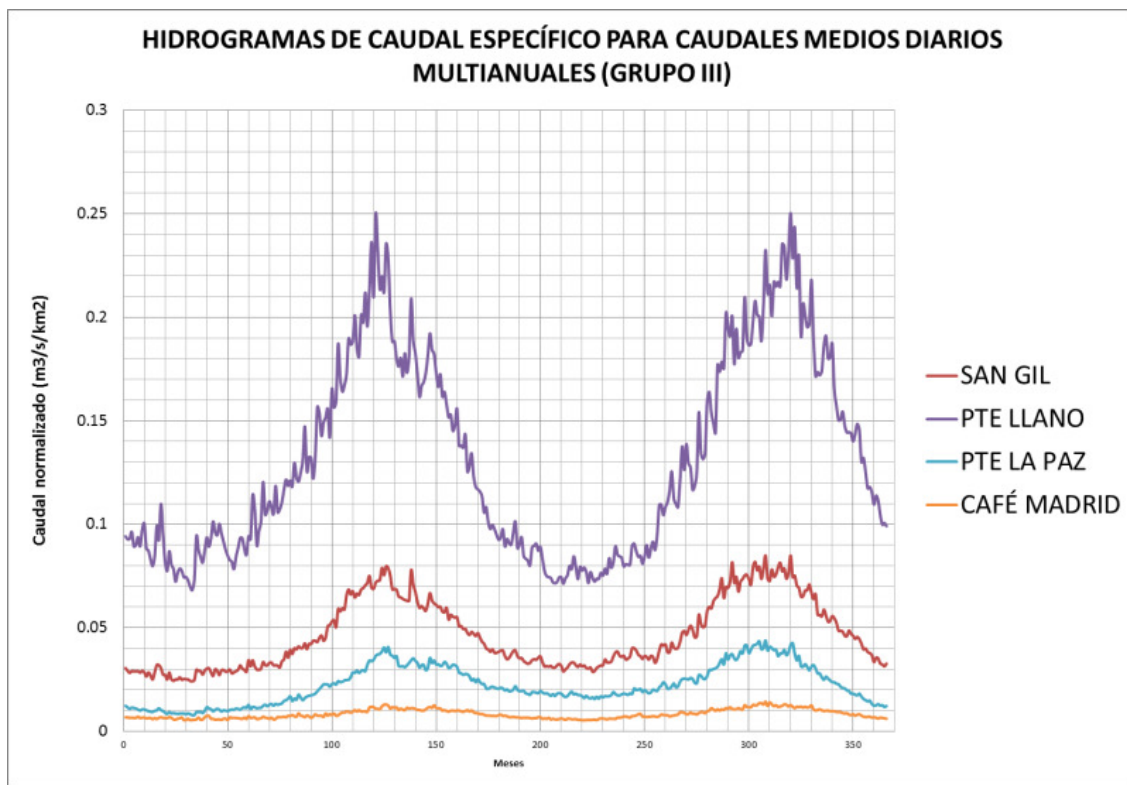


Figura 6. Homogeneidad de caudales (Grupo III).

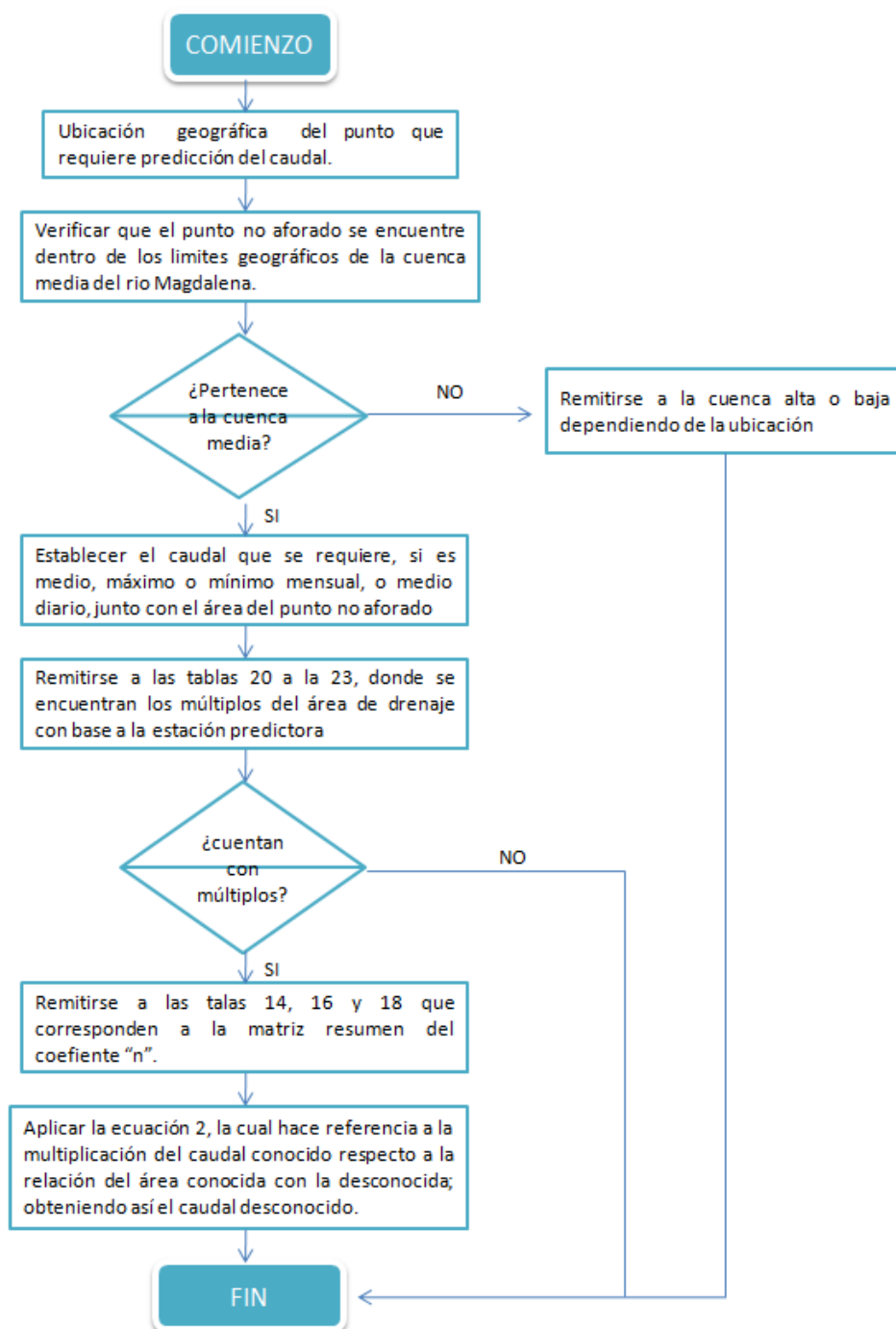


Figura 7. Flujograma de procesos para el cálculo de caudales en zonas no aforadas.



# Implementación de un aerogenerador de 200 W para la iluminación de un apartamento unifamiliar localizado en la localidad de Usme en Bogotá

*Implementation of a 200 W wind turbine for lighting up an apartment located in the locality of Usme in Bogotá*

Cristian A. Granados C.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
cagranadosc@correo.udistrital.edu.co

Edgar E. Londoño M.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
eelondonom@correo.udistrital.edu.co

---

Este artículo detalla el diseño y la instalación de un aerogenerador de 200 W para la iluminación de un inmueble que consta de cinco compartimentos. Para la implementación se opta por re-diseñar y construir el dispositivo antecesor que incluye un sistema tri-pala cuyo estándar aeronáutico es NACA 4412, un amplificador de velocidad y una veleta. Posteriormente, se implementa todo el sistema eléctrico que está compuesto por un generador de imanes permanentes, un sistema de acondicionamiento de señal, un sistema de control y un sistema de acumulación de energía. Finalmente, se realiza un estudio de iluminación donde se elige la luminaria apropiada y las condiciones de iluminación favorables y óptimas para el inmueble según RETILAP.

*Palabras clave:* Aerogenerador, iluminación, regulación

This paper details the design and installation of a 200 W wind turbine for the illumination of a property, consisting of five compartments. For the implementation is chosen redesign and building a predecessor device that including an NACA 4412 tree helix, a speed multiplier and a rudder vane. Subsequently, is implemented the electric system comprises a permanent magnet generator, a system signal conditioning, a control system and a system of energy storage. Finally, a lighting study is done, where appropriate luminary is chosen and favorable lighting for optimal conditions for the property according to RETILAP.

*Keywords:* Lighting, regulation, wind turbine

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Granados, C. y Londoño, E. (2015). *Implementación de un aerogenerador de 200 W para la iluminación de un apartamento unifamiliar localizado en la localidad de Usme en Bogotá*. Revista Tekhnê, 12(1), 49-58.

## Introducción

Esta investigación se centra en el desarrollo de un aerogenerador de 200 W para la iluminación de un inmueble de cinco compartimentos, con el fin de mostrar las ventajas de utilización de sistemas eólicos e impulsar el interés por el uso de fuentes de energías renovables, ya que el uso de sistemas de energía eólica no necesita control de flujo de aire de entrada, lo que disminuye su costo inicial, además de ser una de las energías renovables más amigables con el medio ambiente, ya que cuando los aerogeneradores cumplen su vida útil, su reciclaje se aproxima al 100 %, además de no generar emisiones de dióxido de carbono, entre otros beneficios que hacen de este tipo de energía renovable una de las menos contaminantes de las energías existentes para la generación de energía eléctrica.

El proceso de construcción, instalación, puesta en marcha y evaluación del aerogenerador, consta de ocho secciones en donde se explica paso a paso como se implementaron las piezas que conforman el aerogenerador, con base en sustentos teóricos y antecedentes de construcción de generadores de baja potencia o mini-eólica.

## Metodología

Principalmente se definen una serie de pasos para el estudio inicial del terreno de instalación y se consideran las partes que constituyen al aerogenerador. Posteriormente se asocian estas partes para construir el mismo. La metodología etapa por etapa es la siguiente:

- Diagnóstico de las características generales de instalación del aerogenerador, consumo de energía eléctrica inicial y consideración de la torre soporte del mismo, donde se tiene en cuenta la locación del apartamento unifamiliar, velocidad del viento en la zona, medidas del apartamento y condiciones eléctricas y de iluminación en la vivienda. Finalmente, con todas las características mencionadas, se procede a construir la torre soporte del aerogenerador.

- Rediseño, réplica y construcción de las partes del aerogenerador (aspas, manzana, multiplicador, góndola, veleta). Aquí se tiene en cuenta una valoración mecánica a partir de una base teórica de las partes del dispositivo antecesor, y finalmente se definen las mejoras de diseño para el nuevo dispositivo (re-diseño, replica y construcción de las partes del dispositivo antecesor), sin modificar el tipo de aerogenerador (tripala).

- Generador de inducción *generador síncrono*. Se define el tipo de generador a utilizar a partir de una base teórica de generadores destinados a sistemas de carga de baterías y a mini-eólica (aerogeneradores de baja escala). Finalmente se diseña y construye un generador de imanes permanentes a partir de un alternador de automóvil.

- Acondicionamiento de la señal de salida del generador AC-DC-AC. En este segmento se establecen las etapas de

la señal de salida del generador (AC), rectificador de onda completa (DC), sistema de acumulación de energía a partir de baterías (DC). Finalmente se establece el inversor (AC), para el consumo final. Así mismo se definen las características eléctricas las partes asociadas para que haya compatibilidad en todo el sistema.

- Simulación de características lumínicas con las acciones correctivas propuestas (nuevas tecnologías de iluminación) para el apartamento unifamiliar (software dialux). Este ítem se encuentra directamente relacionado con el primero, ya que se establecen las mejoras en el sistema de iluminación, junto con una simulación que debe estar sujeta a los estándares propuestos por la norma RETILAP.

- Finalmente, se unifican las partes que componen al aerogenerador y se define una ficha técnica del mismo junto con una relación beneficio-costo, donde se tienen en cuenta ahorros de energía eléctrica y un factor de crecimiento del costo de la energía eléctrica, para calcular dicha relación.

## Resultados y análisis de datos

### Diagnóstico general de instalación

**Velocidad del viento en la zona.** La velocidad del viento en la zona es de aproximadamente 5.4 m/s según (Díaz y Romero, 2007), este dato se tomó en cuenta para la construcción del multiplicador que compone el dispositivo antecesor, a su vez se especifica que la velocidad de entrada del sistema es de 204 rpm/m. Esta medida se obtuvo de la construcción de las aspas que más adelante se evidenciará en la sección de réplica del dispositivo antecesor. La dirección del viento se especifica en la rosa de los vientos, ver Fig. 1, la veleta o timón es el encargado de direccionar el sistema (góndola).

Velocidad y dirección del viento promedio mensual [km/h]

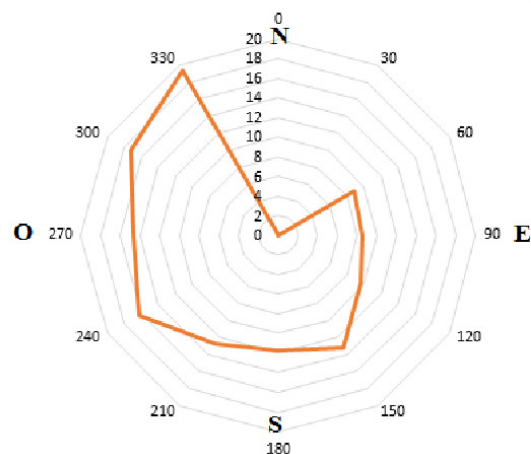


Figura 1. Rosa de los vientos promedio mensual en la Facultad Tecnológica (Universidad Distrital). Periodo 27/02/2013 - 22/08/2014 (López, 2015).

La rosa de los vientos mostrada en la Fig. 1, indica que la dirección Sur dominante es la zona suroeste.

**Medidas del apartamento unifamiliar y condiciones de la instalación.** Como se puede observar en la Fig. 2, el apartamento consta de cinco (5) compartimientos. Cabe destacar que este nivel del predio no cuenta con espacios comunes como baños y cocina, así que en total son cinco espacios a iluminar. El área total del inmueble es de 35,81 m<sup>2</sup>. El área de cada compartimiento se describe en la tabla 1. Esta tabla define las características eléctricas y de iluminación en todos y cada uno de los compartimientos en el inmueble.

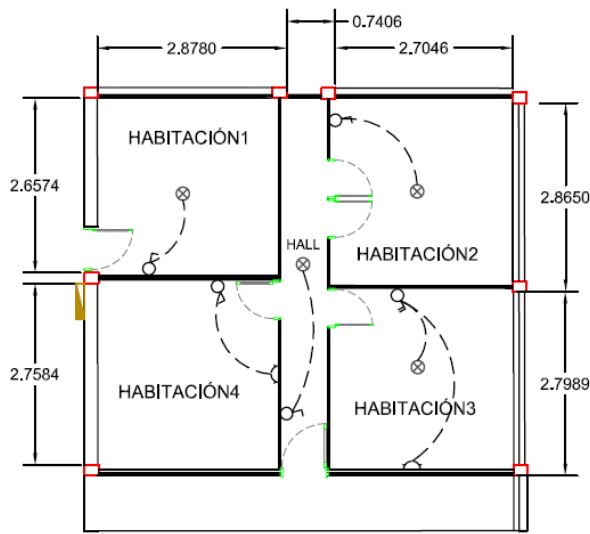


Figura 2. Imagen AutoCAD apartamento unifamiliar acotado en metros.

**Características generales de iluminación.** Como se puede observar en la tabla 2, se determinan las características de iluminación, como iluminancia (lux) y flujo luminoso (lúmen). La iluminancia se obtiene a partir de la relación entre lúmenes y metro cuadrado, el flujo luminoso se obtiene a partir de la información técnica de la bombilla.

Tabla 2  
Iluminancia y lúmenes para cada compartimiento (en condiciones iniciales).

LOCACIÓN APARTAMENTO	ÁREA[m <sup>2</sup> ]	LÚMENES[Lm]	LUX[lm/m <sup>2</sup> ]
Habitación 1	7,6479972	860	112,4477399
Habitación 2	7,748679	860	110,9866598
Habitación 3	7,533	860	114,1643436
Habitación 4	7,9145	1720	217,3226357
HALL	4,1144	860	209,0219716
Total	34,9585762	-----	-----

Como parámetro de diseño, la tabla 3 muestra los regímenes o rangos que se deben tener en cuenta.

Comparándolos con las condiciones iniciales del inmueble en cuanto a iluminación, en cada compartimiento no excede el rango de iluminancia, pero se hace la sugerencia de disminuir la cantidad de lúmenes en la habitación 4 y en el hall se sugiere repartir la carga de iluminación, ya que por la forma alargada del compartimiento, hay zonas en las cuales no alcanza a iluminar o la iluminación es deficiente.

**Demanda y capacidad de producción de energía.** Mediante el análisis de los datos de la Fig. 3 y la tabla 2, se puede predecir a partir de los datos de construcción del dispositivo antecesor, la capacidad de generación del aerogenerador, ya que se parte del diseño y construcción de una turbina eólica de tres aspas construida en fibra de vidrio con un peso de 14,7 kg, 2.52 m de diámetro, 204 rpm con una velocidad del viento de 5.4 m/s. Estas características, son de una turbina de 200 W, así que se garantiza que la potencia del aerogenerador será mayor o igual a 200 W, esta potencia será determinante por el banco de baterías.

### Potencia consumida Vs Hora del Día

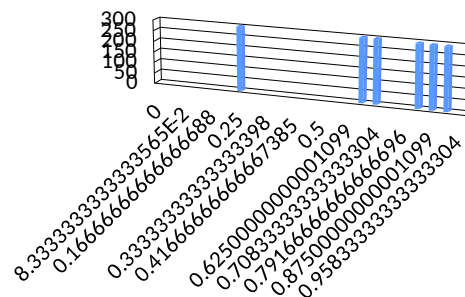


Figura 3. Representación gráfica de la potencia demandada en el periodo de un día de consumo de energía crítico de iluminación.

Mediante la representación gráfica de la Fig. 3, se puede obtener el área bajo la curva, siendo esta la energía consumida en el periodo de un día. La energía consumida en un día es 1,8 kWh.

**Tipo de estructura.** Analizando los tipos de estructuras que existen para esta aplicación se determina que la estructura óptima para las condiciones y recursos disponibles es la torre auto-soportada, ya que esta necesita menor área de instalación. A pesar de tener el requerimiento de *únicamente ser instaladas en terrenos cimentados* (Escudero, 2008), ver tabla 4.

### Mejoras de diseño para el nuevo dispositivo

**Aspas.** Los parámetros de diseño a tener en cuenta se detallan en la tabla 5.

**Manzana.** Para la mejora del mecanismo de giro de las aspas se utiliza el ventilador de un radiador de carro ver Fig. 4, el cual tiene seis palas a las cuales se le realizan unas adaptaciones para convertir las palas del ventilador de

Tabla 1

Disposición de dispositivos instalados con sus respectivas características (en condiciones iniciales).

LOCACIÓN APARTAMENTO	LAMPARAS	Pinstalada [W]	LÚMENES [Lm]	CARACTERÍSTICA/FABRICANTE
Habitación 1	1	60	860	Incandescente/phillips
Habitación 2	1	60	860	Incandescente/phillips
Habitación 3	1	60	860	Incandescente/phillips
Habitación 4	2	120	1720	Incandescente/phillips
HALL	1	60	860	Incandescente/phillips
Total	6	360	-----	-----


Tabla 3

Características de iluminación de interiores (MinMinas, 2010).

TIPO DE RECINTO Y ACTIVIDAD	UGR <sub>L</sub>	NIVELES DE ILUMINANCIA (lx)		
		Mínimo.	Medio	Máximo
<b>Áreas generales en las edificaciones</b>				
Áreas de circulación, corredores	28	50	100	150
Escaleras, escaleras mecánicas	25	100	150	200
Vestidores, baños.	25	100	150	200
Almacenes, bodegas.	25	100	150	200
<b>Talleres de ensamble</b>				
Trabajo pesado, montaje de maquinaria pesada	25	200	300	500
Trabajo intermedio, ensamble de motores, ensamble de carrocerías de automotores	22	300	500	750
Trabajo fino, ensamble de maquinaria electrónica y de oficina	19	500	750	1000
Trabajo muy fino, ensamble de instrumentos	16	1000	1500	2000

Tabla 4

Características generales de la torre aspectos generales.

Tipo de torre	Autosoportada	
Material	Hierro	
Altura aproximada de la torre [m]	3,5	
Altura de instalación de la torre [m]	2,1	
Longitud Acople de la torre [m]	1,25	
Distancia total superficie hasta la turbina [m]	5,6	
Diámetro [cm]	25	
Área Ocupada [m <sup>2</sup> ]	0,81	
Terreno	cimentado	
Distancia Aerogenerador - caja de distribución [m]	4	

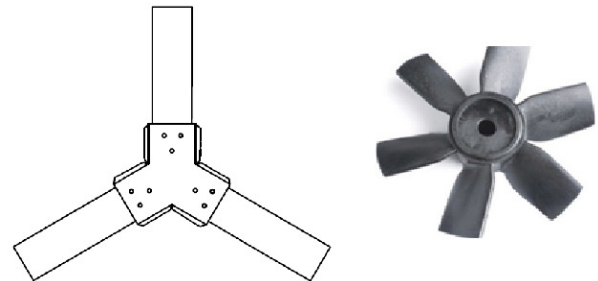


Figura 4. Adaptación de ventilador del radiador de un automóvil como manzana.

Tabla 5

Características de las aspas que componen al dispositivo antesesor.

NACA (referencia de perfil)	4412
Diámetro [m]	2,52
Longitud de aspa [m]	1,26
Fabricación	Revestimiento en fibra de vidrio
	Núcleo de madera

seis a tres palas, este dispositivo permite reducir las pérdidas mecánicas y proporcionar más estabilidad en el sistema mediante los rodamientos que tiene en el centro, permitiendo adaptarle las tres aspas del aerogenerador.

**Multiplicador de velocidad.** Para el sistema de generación se realizó un acople adecuado la parte superior de la pulidora ver Fig. 5 y por medio de la manzana anteriormente mencionada se le añadió el conjunto de aspas, caracterizando el multiplicador de la siguiente manera, con tipo de engranes hipode como lo muestra la Fig. 5, se tiene una potencia mecánica de entrada de 200 W y velocidad de 200 rpm lo que equivale a 20,94 rad/s, así se determina el

torque motor que es una razón entre potencia mecánica de entrada y velocidad angular, que sería igual a 9,55 Nm.



Figura 5. Multiplicador de velocidad (1000 W) de engranes Hipode con dentado recto (González, Río, Tena, y Torres, 2011).

Se necesita encontrar un amplificador con relación de transmisión aproximada a 4. La relación de transmisión se define como la relación entre las velocidades angulares, y está dada por  $\omega_{salida}/\omega_{entrada}$ . Se encontró en el mercado un tren de engranajes con relación  $a$  de 3,5 que se implementa en el sistema. Con esto se puede decir que la velocidad de salida se determina mediante la ecuación 1.

$$a = \frac{\omega_{salida}}{\omega_{entrada}} \quad (1)$$

$\omega_{salida} = 3,5 \times 20,94 \text{ rad/s} = 73,29 \text{ rad/s}$ , lo que equivale a 699.86 rpm. Así mismo, la relación de torque se determina por la ecuación 2.

$$a = \frac{\tau_{entrada}}{\tau_{salida}} \quad (2)$$

Obteniendo un torque de salida de (ecuación 3):

$$\begin{aligned} \tau_{salida} &= \frac{\tau_{entrada}}{a} = \frac{9,55 \text{ Nm}}{3,5} \\ \tau_{salida} &= 2,728 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (3)$$

Manteniéndose así la potencia generadora igual a 200 W.

**Sistema de orientación.** El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para orientar el rotor en este caso se utiliza la orientación mediante aleta estabilizadora, *Esta solución consiste en una aleta que se acopla al rotor de la eólica tal que mantiene el plano de rotación de las palas perpendicular al viento. Es una solución sencilla y de bajo coste, por eso se utiliza para aerogeneradores de baja potencia* (Hernández, 2005).

Las distancias características del sistema de orientación se pueden ver en la Fig. 6, donde:

- $E$ : Es la distancia del centro de las palas hasta el centro de la torre, en este caso para el centro del acople de la torre auto-soportada.
- $L$ : Es la longitud de la veleta, que va desde el centro del acople hasta el centro de la aleta orientadora.
- $D$ : Diámetro de la circunferencia que barre la turbina.

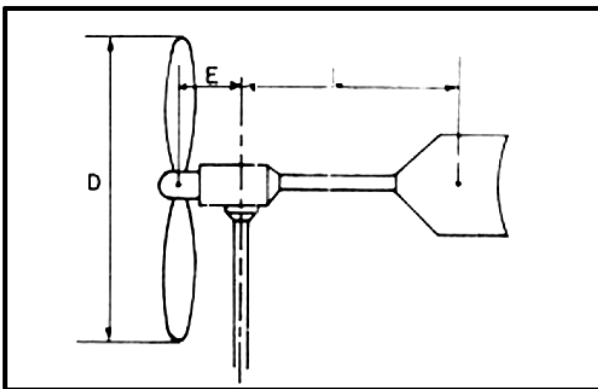


Figura 6. Orientación mediante aleta estabilizadora (Hernández, 2005).

La superficie  $s$  de la aleta debe tener, en función de  $A$  área barrida por la turbina, un valor de la superficie  $s = 0,04 A$ . Este valor se utiliza para una turbina tripala, entonces la superficie de la aleta es (ecuación 4):

$$\begin{aligned} s &= 0,04\pi \times r^2 \\ s &= 0,04\pi \times (1,26 \text{ m})^2 \\ s &= 0,1995 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

En la práctica se aconseja tomar un número aproximado al diámetro de la turbina, para determinar  $L$ , en este caso se elegirá el 60 % del diámetro (Díaz y Romero, 2007). Con  $D = 2,52 \text{ m}$  entonces  $L$  es (ecuación 5):

$$\begin{aligned} L &= 0,6 \times 2,52 \text{ m} \\ L &= 1,512 \text{ m} \end{aligned} \quad (5)$$

Así,  $E$  se determina como (ecuación 6):

$$E = \frac{L}{4} = \frac{1,512}{4} = 0,378 \text{ m} \quad (6)$$

### Generador síncrono de imanes permanentes

Entre los generadores sincrónicos, se encuentra el generador de imanes permanentes, el cual proporciona energía limitada por la vida útil de los imanes utilizados, lo que proporciona eficiencia al sistema como se puede observar en la Fig. 7. El diagrama de flujo de potencia para un generador síncrono convencional muestra una potencia de entrada ( $P_{in}$ ), de una sumatoria entre la potencia mecánica motora y la potencia que otorga el campo magnético ( $V_f \times I_f$ ). Las flechas que no pertenecen a la línea horizontal son las pérdidas producidas por el campo magnético, pérdidas mecánicas como rozamiento ( $P_r$ ), ventilación y pérdidas misceláneas ( $P_{st}$ ) y las pérdidas en el cobre del estator ( $P_{co}$ ).

Así la expresión que se utiliza para la potencia de entrada del generador síncrono es (ecuación 7):

$$P_{in} = \tau_s \times \omega_s + V_f \times I_f \quad (7)$$

Donde  $\tau_s \times \omega_s$  es la potencia mecánica de entrada igual a 200 W. Así mismo, se puede determinar la potencia que pueden suministrar los imanes de Neodimio, a partir de un estudio de adaptación de imanes de neodimio en un alternador de automóvil (Pinilla, 2004), donde la energía se representa mediante la ecuación 8.

$$E_m = \frac{(B - H)_{max} \times V \times N}{2} \quad (8)$$

Dónde:

- $E_m$ : Es la energía máxima producida por los imanes.
- $(B - H)$ : Es el producto máximo de energía por unidad de volumen, de la curva característica densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético.
- $V$ : Es el volumen del imán usado.
- $N$ : Es el número de imanes.

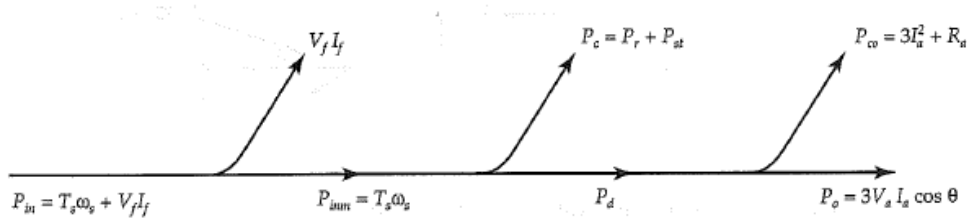


Figura 7. Diagrama flujo de potencia de un generador síncrono (Guru y Hiziroglu, 2003).

Por ende es necesario conocer la cantidad y las medidas de los imanes a utilizar y las características magnéticas (Pinilla, 2004). En la tabla 6 se muestra un imán compatible con el generador a utilizar. Además de ser compatible es genérico en el mercado.

Tabla 6  
Características magnéticas y geométricas de los imanes de Neodimio.

Características Magnéticas		Características Geométricas	
Producto de (B-H)máximo	321 kJ/m <sup>3</sup>	Material	Tierras Raras (Neodimio)
Remanencia	11400 – 12000 Gauss	Longitud	46mm
Temperatura de Curie	120 °C	Espesor	10mm
Densidad	7.5 kg/m <sup>3</sup>	Ancho	21mm
Fuerza Campo Coercitivo	930kA/m	Cantidad	6

De esta manera se puede dar solución a la ecuación 8, siendo así la energía producida (ecuación 9):

$$E_m = \frac{321 \text{ kJ/m}^3 \times 46 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 21 \text{ mm} \times 6}{2} = 9,3 \text{ J} \quad (9)$$

La tabla 7, representa la potencia emitida por el campo magnético de los imanes localizados en el rotor.

Tabla 7  
Parámetros técnicos de potencia con cambios de velocidad en el rango de utilización.

Em [J]	n [rpm]	w [rad/s]	P f [W]	PIn [W]	Pout [W]
9,30	200	20,94395102	194,8327799	394,83278	256,641307
P mecánica [W]	250	26,17993878	243,5409749	443,54097	288,301634
	300	31,41592654	292,2491699	492,24917	319,96196
200	350	36,65191429	340,9573649	540,95736	351,622287
	400	41,88790205	389,6655598	589,66556	383,282614
"Eficiencia"	450	47,1238898	438,3737548	638,37375	414,942941
	500	52,35987756	487,0819498	687,08195	446,603267
65%	550	57,59586532	535,7901448	735,79014	478,263594
	600	62,83185307	584,4983397	784,49834	509,923921
650	650	68,06784083	633,2065347	833,20653	541,584248
	700	73,30382858	681,9147297	881,91473	573,244574
750	750	78,53981634	730,6229247	930,62292	604,904901

La potencia de campo ( $P_f$ ) resulta de multiplicar la energía resultante por la velocidad angular a la cual se encontrará girando, en el rango de multiplicación, que se encuentra aproximadamente entre 200 rpm y 700 rpm, ver tabla 7. La potencia de entrada se determina a partir de la ecuación 7.

La potencia de salida se determina a partir de la ecuación 10 y la eficiencia  $n$  se determina a partir de la Fig. 8.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (10)$$

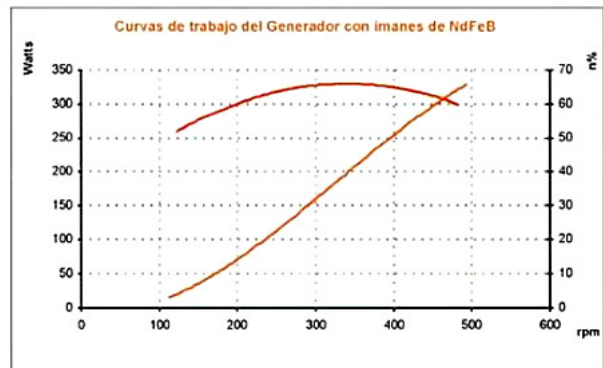


Figura 8. Curva característica de un generador con imanes permanentes de Neodimio (Chiroque, 2008).

Como era de esperarse, la potencia eléctrica de salida del generador es directamente proporcional a la velocidad. En el rango de 200 rpm a 700 rpm, la potencia crecerá de manera lineal (Fig. 9), el limitante de velocidad se dará en la cual la corriente generada supere la corriente nominal del alternador, de aproximadamente 65 A, con una tensión referencial de 14 V (véase tabla 8), tensión proporcionada por la batería. Se puede determinar que la potencia límite de generación será aproximadamente 780 W, de esta manera se supera el límite del rango de velocidad.

Tabla 8  
Características eléctricas del alternador utilizado (Bosh, 2010).

Marca del alternador	Bosch
Automóvil de aplicación	Ford F-350
Tensión Nominal [v]	12
Corriente Nominal [A]	65
Polos	16

**Obtención del generador de acuerdo a las necesidades y recursos disponibles.** Para la obtención del generador de imanes permanentes se opta por la modificación de un

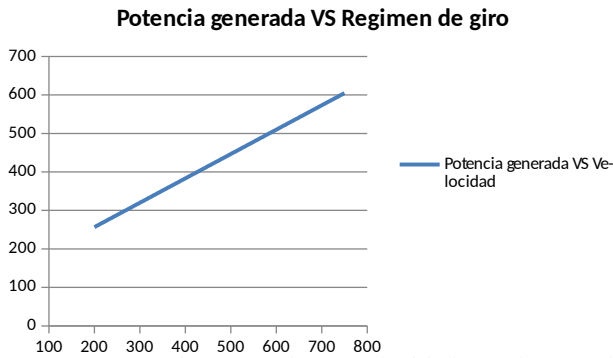


Figura 9. Potencia generada vs velocidad en el rotor del generador (zona lineal).

alternador de automóvil (ver Fig. 10) cuyas características se muestran en la tabla 8.

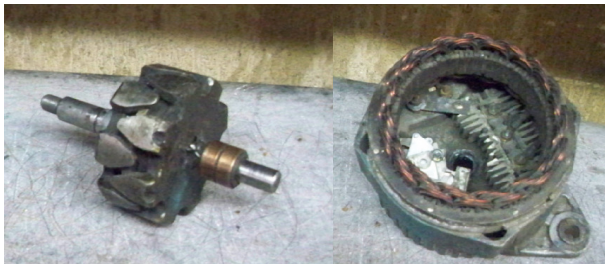


Figura 10. Alternador de automóvil usado para la generación.

Las modificaciones que se realizan para obtener a partir de un alternador sincrónico convencional un generador de imanes permanentes, se basan en la modificación del rotor del mismo, donde se extraerá el devanado del inducido del generador y se le añadirán 6 (seis) imanes de neodimio grado 45. El generador está compuesto por (dieciséis) 16 polos, cómo se puede observar en la tabla 8. Estos polos, serán producidos por medio de la excitación propia que proporcionan los imanes. La cantidad de imanes está dispuesta por las características mecánicas del rotor, las medidas de los mismo y por economía.

### Acondicionamiento de la señal de salida del generador AC-DC-AC

**Rectificador de onda completa.** En la Fig. 11 se puede observar la configuración de diodos que se utiliza para convertirla corriente de alterna a continua. Esta señal se deja disponible para alimentar el sistema de almacenamiento de energía, para posteriormente satisfacer valores de tensión y frecuencia mediante un inversor de tensión. Para el generador se sustituye el rectificador de onda completa trifásico por uno monofásico de 50 A. Así mismo, el conexionado de los devanados se modifica en conexión aditiva en serie.

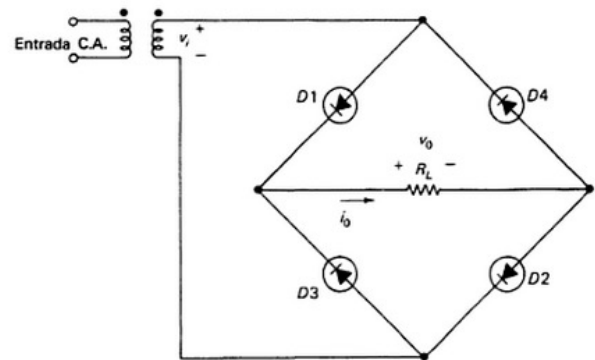


Figura 11. Puente rectificador de onda completa (Puente wheatstone) (Cirovic, 1995).

**Controlador de carga de baterías.** Se elige el multivibrador 555 en configuración astable, que opera como controlador de tensión. Este opera como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Estado de salida a partir de la variación de tensión (Coughlin y Driscoll, 1999).

Estado de operación	Terminal 2 de disparo	Terminal 6 de umbral	Estado de terminales	
			Salida 3	Descarga 7
A	Abajo de $V_{LT}$	Abajo de $V_{LT}$	Alto	Abierto
B	Abajo de $V_{LT}$	Arriba de $V_{LT}$	Alto	Abierto
C	Arriba de $V_{LT}$	Abajo de $V_{LT}$	Recuerda el último estado	
D	Arriba de $V_{LT}$	Arriba de $V_{LT}$	Bajo	Tierra

En la Fig. 12 se detalla la configuración y evaluación por simulación del regulador de tensión. Se opta por implementar el diseño, donde incluyen en el circuito valores nominales y accesorios que facilitan la puesta en marcha del controlador de carga de baterías.

**Banco de acumuladores.** Para la inclusión del banco de acumuladores se opta por elegir una única batería cuyas especificaciones se muestran en la tabla 10, teniendo en cuenta el factor de utilización y la potencia de la carga que se alimentará.

Tabla 10

Tiempo de carga y descarga de la batería con suministro máximo de potencia a la carga.

Batería	Potencia Máxima de entrega a la carga		
Tensión nominal [V]	12	I min a t Máx [A]	1,8
Horas de uso máx. [h]	20	Energía suministrada [Wh]	432
A-h	36	P carga a I Máx de desc[W]	132
I Máx de descarga [A]	11	Tiempo de descarga [h]	3,27272727
I Máx de carga [A]	13,5	P carga a I Máx de carga [W]	162
Tensión de Carga típica [V]	14,5	Tiempo de carga [h]	2,66666667
Material	Plomo y Acido		

Como se puede observar en Fig. 3, el intervalo de las 18 a las 20 horas, las baterías se estarán cargando por un periodo de 2 horas. En este tiempo no estará consumiendo energía

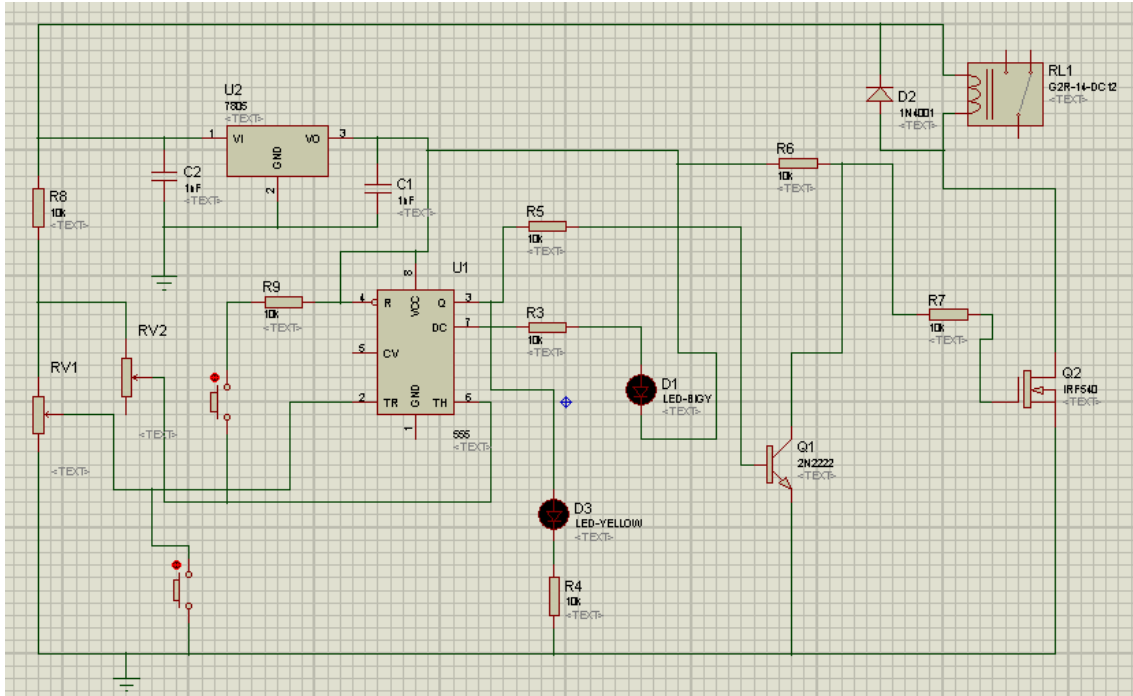


Figura 12. Simulación del controlador de carga software ISIS Proteus 7.7.

alguna por la carga. Entonces, como se puede determinar en la tabla 10 (potencia máxima de entrega a la carga), así el tiempo necesario para la carga de la batería no se cumpla, el suministro de energía se dará sin interrupciones. Teniendo en cuenta que el tiempo de carga de aproximadamente 2,66 h, se relaciona con un suministro de 162 W de potencia activa, mayor potencia a la requerida por la carga.

La tabla 11 muestra la potencia máxima que puede suministrar la batería cargada totalmente para cada intervalo.

Tabla 11  
Corriente y potencia activa máxima Generada por la batería para cada intervalo de tiempo de uso cargada totalmente.

CONCEPTO	Corriente máxima [A]	Potencia máxima [W]
Intervalo 1 Hora	36	432
Intervalo 2 Horas	18	216
Intervalo 3 Horas	12	144

**Inversor de tensión.** Teniendo en cuenta que el inversor debe soportar una potencia mayor a 200 W, en el mercado se encuentra un inversor con las siguientes especificaciones (tabla 12).

### Ficha Técnica del aerogenerador

En la tabla 13 se puede observar la ficha técnica del aerogenerador, donde se presentan las características mecánicas y eléctricas del mismo.

Sobre el diseño final se realiza un estudio beneficio-coste de la inversión en el aerogenerador, y un estudio de

Tabla 12  
Inversor de corriente implementado en el sistema de generación.

Tipo de salida:	Doble
Potencia de salida:	600-7000W
Nombre de la marca:	Cobra
Tamaño:	260*165*85mm
Voltaje de entrada:	12V DC
Voltaje de salida:	110V AC
Frecuencia de salida:	60Hz
Peso:	3kg
Potencia continua	600W
Pico de potencia	1000W
Eficiencia:	>85%
Material de la carcasa	Aluminio
Estado	Usado

iluminación donde se considera el tipo de luminaria eficiente en el sistema a partir de simulaciones en DIALUX.

### Conclusiones

La energía eólica es un recurso que a grandes rasgos podrá suplir las energías no renovables, claro está que con mayor infraestructura.

Con respecto al generador de imanes permanentes, la adaptación que se realizó consta de la inclusión de imanes a las caras magnéticas del rotor, sin interferir en la construcción del mismo, conservando el número de polos del generador y a su vez manteniendo el torque de arranque que



Tabla 13

Ficha técnica del aerogenerador.

<b>Número de hélices</b>	3
<b>Material hélices</b>	Fibra de vidrio con resinas epoxicas nucleo de madera
<b>Generador</b>	600 rpm   16 polos   imanes de nodimio
<b>Potencia</b>	780 W
<b>Potencia nominal curva</b>	500 W
<b>Voltaje</b>	12 V
<b>Sentido de giro</b>	Horario
<b>Área Barrida</b>	4,98 m <sup>2</sup>
<b>Peso</b>	120 kg
<b>Aplicaciones</b>	Conexiones Aisladas a Baterías, excedentes de energia para calentador de agua.
<b>Viento para arrancar</b>	2 m/s
<b>Velocidad nominal</b>	5 m/s
<b>Rango de generación</b>	De 5 a 40 m/s
<b>Supervivencia</b>	60 m/s
<b>Tipo</b>	Rotor horizontal a barlovento
<b>Orientación</b>	Timón de Orientación o veleta
<b>Transmisión</b>	Caja multiplicadora factor 3,5 engranage hipoide con cardán de 90 cm
<b>Regulador de carga</b>	A nivel de tensión de la batería. 480 V
<b>Inversor</b>	Eficiencia 85 % tensión 12 VDC/110 VAC
<b>Protección anti-corrosión</b>	Resinas epoxicas, acabado en anticorrosivo
<b>Vida útil</b>	Más de 20 años
<b>Torre</b>	5,6 m autosoportada desarmable, equipo eléctrico facil mantenimiento



es determinante para velocidades bajas. Teniendo en cuenta el devanado del estator, se conserva el calibre del mismo, ya que según los fabricantes este calibre es característico para la carga de baterías y con respecto a la conexión del bobinado se cambia la conexión en estrella, por una conexión serie de los tres devanados, debido a que esta conexión tiene la característica de generar más tensión que la conexión trifásica en estrella.

Teniendo en cuenta el cambio de conexión del generador de trifásico en estrella a monofásico, el nuevo rectificador de onda completa se cambia de trifásico a monofásico, con la ventaja de encontrar una gama amplia de rectificadores de onda completa monofásica en el mercado a diferencia del rectificador de onda completa trifásico que es muy escaso en el mercado.

El controlador de carga está limitado por un fusible de 40 A con el fin de proteger ante sobre corrientes el mismo, se reitera que las baterías que se pueden usar deben ser de 12 voltios, ya que la entrada de tensión del inversor debe estar ente 11,9 V y 15 V aproximadamente. Se destaca el funcionamiento del controlador de carga, ya que su función

es flexible, económica y sencilla, se destaca el uso de PWM (modulación de ancho de pulso) en microcontroladores para sistemas de mayor envergadura.

Con respecto a la iluminación del inmueble la uniformidad se vio afectada en algunos compartimentos, donde se recomienda incluir más luminarias o realizar una distribución de carga en la instalación.

La relación beneficio costo muestra que a los cuatro años se recupera la inversión inicial, teniendo en cuenta que la vida útil del aerogenerador es de mínimo veinte años, los recursos monetarios que puede proveer el aerogenerador son muy grandes, además de que se incluyó una infraestructura mecánica robusta de la cual se puede aprovechar incluyendo sistemas de generación y de acumulación más robustos.

El sistema en general permite la inclusión de al menos el doble de carga existente, teniendo en cuenta la magnitud de potencia de los dispositivos existentes.

El aerogenerador no cuenta con pararrayos ni está conectado al sistema de puesta a tierra del inmueble.

## Recomendaciones

Para mejorar la eficiencia del generador de imanes permanentes se sugiere añadir más cantidad de imanes en el campo del rotor, para que este pueda operar en condiciones nominales a un rango de velocidad menor y para que aumente la potencia generada.

Se recomienda incluir protecciones térmicas y magnéticas para la seguridad del sistema implementado.

Se recomienda optimizar el controlador de carga, utilizando moduladores de ancho de pulso o hacer uso de controladores programables, con el fin de proporcionar confiabilidad al sistema.

Las baterías tienen una vida útil de aproximadamente tres años, así que esta se convierte en una de las pocas desventajas del sistema realizado. Se recomienda cambiar la batería cada tres años.

Teniendo en cuenta que el sistema en general permite la inclusión de al menos el doble de carga existente, se recomienda ampliar la instalación alimentada por el aerogenerador, para que este pueda ofrecer mayor rendimiento.

Se recomienda incluir un freno mecánico para proteger el sistema ante altas velocidades.

Se debe incluir un sistema de carga adicional para la entrega de excedentes de energía eléctrica, propuesto como una resistencia para calentar agua.

Se recomienda incluir pararrayos y conectar el aerogenerador al sistema de puesta a tierra del inmueble.

## Referencias

Bosh. (2010). *Marchas, alternadores y componentes*. (Bosch Autopartes)

- Chiroque, J. (2008). *Microaerogenerador it-pe-100 para electrificación rural*. Soluciones Prácticas ITDG. (Serie Manuales N. 34)
- Cirovic, M. (1995). *Electrónica fundamental: dispositivos, circuitos y sistemas*. Reverte.
- Coughlin, R., y Driscoll, F. (1999). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Prentice Hall.
- Díaz, C., y Romero, J. (2007). *Diseño y construcción de un sistema amplificador de velocidad y una base para soportar un aerogenerador de tres aspas de 200 vatios*. (Universidad Distrital Francisco José de Caldas)
- Escudero, J. (2008). *Manual de energía eólica* (2.ª ed.). Mundi-Prensa Libros.
- González, T., Río, G., Tena, J., y Torres, B. (2011). *Circuitos de fluidos. suspensión y dirección*. S.A. Editex.
- Guru, B., y Hiziroglu, H. (2003). *Máquinas eléctricas y transformadores* (3.ª ed.). Universidad Iberoamericana.
- Hernández, J. (2005). *Diseño de un aerogenerador de baja potencia*. (Polytechnic University of Catalonia)
- López, G. (2015). *Análisis de datos de la estación meteorológica PEGASUS de la facultad tecnológica de la universidad distrital*. (Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas - Grupo GIEAUD)
- MinMinas. (2010). *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP*. (Ministerio de Minas y Energía)
- Pinilla, A. (2004). *Adaptación de un generador eléctrico de imanes permanentes y flujo radial*. (Universidad De Los Andes)



# Actuadores inteligentes con protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y medio físico RS-485

*Intelligent actuators with I<sup>2</sup>C communication protocol and RS-485 physical medium*

Erika Pimentel O.

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

Yeferson Yate M.

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

Jorge E. Porras B.

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

---

Este artículo muestra el desarrollo de un sistema Maestro/Esclavo haciendo uso del protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C por medio físico RS-485 para el control de los actuadores que trabajan en la PPA (Planta de Procesos Análogos) con el fin de reemplazar ciertas funciones del PLC (Controlador Lógico Programable) con el que cuenta actualmente la planta. Este sistema se implementa utilizando PSoC 4200 Prototyping Kit, el sistema es inteligente por tener las características de llevar la cuenta del uso del actuador, el estado del mismo (On/Off) e informar en caso de desconexión por factores externos (desgaste o daño en las líneas de comunicación y/o hardware) o interno (comunicación fallida).

*Palabras clave:* Actuador inteligente, I<sup>2</sup>C, PSoC

This paper shows the development of a Master/Slave system using I<sup>2</sup>C communication protocol for RS-485 physical medium to control actuators working in the APP (Analog Process Plant) in order to replace certain functions of the PLC (Programmable Logic Controller) which currently has the plant. This system is implemented using PSoC 4200 Prototyping Kit, the system is smart to have the features to keep track of the use of the actuator, the condition (On/Off) and report in case of disconnection by external factors (wear or damage in the communication lines and/or hardware) or internal (failed communication).

*Keywords:* Intelligent actuator, I<sup>2</sup>C, PSoC

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Pimentel, E., Yate, Y. y Porras, J. (2015). *Actuadores inteligentes con protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y medio físico RS-485*. Revista Tekhnê, 12(1), 59-66.

## Introducción

En la actualidad se tienen en uso tecnologías de alto costo (PLC) y software privado como la plataforma Rockwell la cual requiere de la adquisición de licencias, para el desarrollo de sistemas de control y automatización necesarios para el crecimiento de la empresa. En este caso se propone hacer uso de tecnologías de bajo costo y software libre para el desarrollo de sistemas de control, implementando el sistema a la PPA ubicada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Esta se encuentra en proceso de desarrollo y construcción, el cual ha sido afectado por un alto costo de los componentes necesarios para su finalización. Por esta razón se implementa un sistema de comunicación basado en el protocolo I<sup>2</sup>C haciendo uso del medio físico RS-485, el cual se encarga de la supervisión y control de los actuadores en la PPA.

Partiendo de lo anterior, este proyecto está dividido en cinco bloques fundamentales. El primero de ellos hace énfasis en el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C entre un PSoC (Maestro) con dos PSoC (Esclavo). Esto permite trabajar diferentes dispositivos con dos hilos de comunicación, los cuales serán los encargados de transmitir las señales correspondientes a las acciones de los actuadores a utilizar. Posterior a esto se implementa una comunicación bidireccional entre el PSoC (Maestro) y los PSoC (Esclavos), permitiendo no solamente transmitir las señales de control, su estado (On/Off) y la respectiva cuenta de activación de los actuadores, además de recibir las señales generadas por los PSoC (Esclavos) supervisando así la correcta conexión.

El segundo bloque se encarga de la comunicación entre la interfaz y el sistema de control por medio del RS-232. El tercer bloque preserva los datos y estado (On/Off) de los esclavos guardando esta información en la EEPROM (ROM programable y borrable eléctricamente). El cuarto bloque busca extender los dos hilos de comunicación I<sup>2</sup>C dado que este trabaja a cortas distancias se ve limitado en su implementación en sistemas industriales. Se hace uso del I<sup>2</sup>C dado que la mayoría de microcontroladores no poseen RS-485. Por medio de la conversión de I<sup>2</sup>C a RS-485 se da un mayor alcance al protocolo ya que este tiene la característica de trabajar a 1.200 m a velocidades de 100 Kbps, llegando a un máximo de 120 esclavos, lo que permite la implementación de diferentes actuadores en el sistema.

En última instancia, el quinto bloque consiste en una interfaz gráfica generada en Python a través de la cual el usuario podrá activar los actuadores mediante botones que permitirán el cambio de estado (On/Off) además de poder visualizar la cuenta de activación y avisar al usuario cuando el actuador realice 100.000 activaciones para realizar mantenimiento preventivo y correctivo al actuador.

Este documento describe la realización del proyecto, el cual busca desarrollar sistemas de control orientados a tareas específicas en plantas de procesos análogos mediante la

interfaz gráfica, haciendo uso de tecnologías de bajo costo esto permite reducir costos y gastos relacionados al control y mantenimiento de dichos sistemas, además de brindar una alternativa a la utilización del PLC en el control de procesos industriales tales como el tratamiento de agua en procesos residuales. Se pretende mostrar la aplicabilidad de software libre y tecnologías asequibles en el mercado, y por ende el impacto que pueden tener en la solución de problemas de la vida real. Por último, se mencionaran los resultados obtenidos y las conclusiones.

## Metodología

### Propuesta general

La PPA (Fig. 1) es una planta de procesos análogos que cuenta con tres tanques y una bomba de agua que funciona a través de un motor trifásico. El objetivo de la planta es el control de nivel y temperatura en los diferentes tanques de proceso: agua caliente, mezcla y agua fría. Funcionan a través de electroválvulas (Fig. 2) a 110 V, accionadas por medio de relevos a 5 V. El objetivo del proyecto es realizar un sistema de supervisión y control de los actuadores (en este caso las electroválvulas de la PPA), e implementar el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C utilizando RS-485 como medio físico.



Figura 1. Planta de procesos análogos PPA.

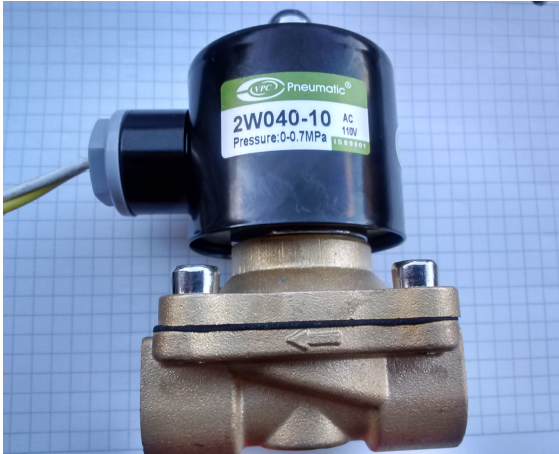


Figura 2. Electroválvula 1/2 pulgada a 110 V.

### Comunicación I<sup>2</sup>C entre PSoC (Maestro-Eslavos)

En primera instancia se desarrolló el código base en PSoC para la comunicación entre dos dispositivos un PSoC (Maestro) y un PSoC (Esclavo) a través de I<sup>2</sup>C, permitiendo transmitir señales de control de maestro a esclavo. Para evidenciar la transmisión se hizo uso de un LED (azul) como indicador para verificar visualmente que el proceso de transmisión maestro a esclavo se realizara correctamente.

Posterior a esto se utilizó el código del esclavo para hacer el proceso descrito en el párrafo anterior. Con dos esclavos se evidencia el uso del protocolo I<sup>2</sup>C al trabajar con diversos dispositivos a través de sus dos hilos de comunicación, la prueba se realizó obteniendo los resultados esperados. Por ende, se modifica el código para implementar dispositivos externos, haciendo uso de un teclado para el maestro y una LCD para el esclavo, de esta manera el teclado selecciona los datos a enviar y la LCD permite visualizar los mismos, con esto se concluye que se realiza una comunicación unidireccional del maestro al esclavo correctamente.

**Comunicación I<sup>2</sup>C bidireccional.** Para implementar la comunicación bidireccional se procede a transmitir y recibir datos simultáneamente entre el PSoC (Maestro) y el PSoC (Esclavo). Para esto, se utiliza un proceso similar a la comunicación unidireccional a través de indicadores tanto en el maestro como en el esclavo. Al realizar las pruebas se refleja la transmisión de maestro a esclavo pero la recepción de datos correspondientes al maestro presenta falencias. Se procede a transmitir un dato desde el esclavo y compararlo en el maestro. Al realizar esta comparación correctamente un indicador debe encenderse, después de modificar el código y probarlo se obtiene el resultado esperado (Cypress, 2015b).

### Pruebas entre PSoC y RS232

Se realiza la configuración en el PSoC (Maestro) el cual se encarga de comunicar con el PC por medio del RS232.

Haciendo uso del software CoolTerm, el cual simula la comunicación de un puerto serial, con esto se pretende visualizar el dato recibido en el maestro, al realizar las pruebas correspondientes se evidencia que el dato recibido esta en formato hexadecimal, con lo cual se procede a intentar enviar un dato entero. El dato en el esclavo se modifica para ser enviado como un entero sin signo de 8 bytes, lo que nos permite trabajar con datos de envío entre 0-256. Al realizar la prueba se obtienen los datos esperados.

Se procede a enviar datos mediante el puerto serie para que el maestro manipule su actuador o transmita comandos específicos a los esclavos para que estos manipulen sus respectivas actuadores. Se implementa un proceso para llevar la cuenta de activación, pero el dato se ve limitado a una cuenta de 8 bytes, lo cual permite un máximo de 256 cuentas. En vista de esto, es necesario crear una rutina que permita extender la cuenta. Se realizó el siguiente proceso en el PSoC con el fin de llegar a un valor cercano a los 24 Bytes (tabla 1).

El proceso para la cuenta total es el siguiente (ecuación 1):

$$Cuenta = (64516 \times cuenta_2) + (254 \times cuenta_1) + contador \quad (1)$$

Donde *cuenta\_1*, *cuenta\_2* y *contador* son los datos leídos o generados por el maestro. Durante la realización de este proceso se presenciaron diversos errores en el reconocimiento correspondiente a cada variable, lo que generó datos erróneos en la cuenta. Después se logra sincronizar correctamente la trama de datos recibidos, permitiendo llegar a un valor máximo de 16451834 cuentas, en la Fig. 3 se puede observar los módulos correspondientes a los esclavos en el sistema. Finalmente, se realizan procesos continuos de lectura en el PSoC (Maestro) y verificación de la conexión I<sup>2</sup>C de los esclavos, en caso de que algún hilo del esclavo este desconectado el indicador (verde) se activa, estableciendo una comunicación bidireccional exitosa.



Figura 3. Módulos PSoC (esclavos).

Tabla 1

Rutina PSoC de conteo.

```

if (contador==255u && cuenta_1 == indicador_cuenta_1 && cuenta_1 != 255u){
    contador=1u;
    indicador_cuenta_1 = indicador_cuenta_1+1u;
    cuenta_1 = cuenta_1+1u;

} else if (cuenta_1 == 255u && cuenta_2 == indicador_cuenta_2 && cuenta_2 != 255u)
{
    contador=1u;
    cuenta_1 = 1u;
    indicador_cuenta_1 = 1u;
    cuenta_2= cuenta_2+1u;
    indicador_cuenta_2 = indicador_cuenta_2+1u;
} else if (cuenta_1 == 255u && cuenta_2 == 255u){
    contador=0;
    cuenta_1=0u;
    cuenta_2=0u;
    indicador_cuenta_1 = 0u;
    indicador_cuenta_2 = 0u;
}
    
```

**EEPROM**

La característica principal de la EEPROM es que permite guardar y preservar datos hasta 20 años en la memoria del PSoC. Utilizando el código ejemplo brindado por Cypress de la EEPROM en el PSoC, al intentar hacer uso de dicho ejemplo se observa un fallo en el mismo, debido al *bootload* con el cual se carga el programa en el microcontrolador. Al realizar las pruebas correspondientes cortando la alimentación del dispositivo, se genera un cambio de estado en el microcontrolador, obligando a cargar de nuevo el *bootload*. Para solucionar este problema se optó por hacer uso del KitProg, el cual puede programar y depurar el PSoC. Al tener la posibilidad de preservar los datos en la EEPROM como el estado actual del actuador (On/Off). En caso de falla en la fuente de alimentación, la cuenta de activación y el estado del actuador se retornaran al restablecer la alimentación en el dispositivo (Cypress, 2015a).

**Medio físico RS-485**

Haciendo uso del estándar RS-485 el cual consiste en un bus de transmisión multipunto diferencial, se busca brindar un mayor alcance en las señales del protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C haciendo la correspondiente conversión al estándar RS-485. En la Fig. 4 se muestra un proceso en la adaptación de las señales SDA y SCL, tanto en el maestro como en los esclavos.

El circuito correspondiente al bloque RS-485 se puede observar en la Fig. 5. El módulo de conversión hace uso de los componentes electrónicos detallados en la tabla 2.

Tabla 2

Elementos utilizados en la elaboración del módulo RS-485.

Cantidad	Nombre
2	Max 485
4	Resistencias 2.2K
4	Resistencias 680
2	Diodos 1N4148
1	Trimmer 1K
1	Lm339

**Funcionamiento.** El Max 485 cuenta con una salida (RO) y una entrada (DI), una habilitación de lectura (RE) y de escritura (DE). Al estar RE y DE en 1 lógico se escribe DI, en caso contrario 0 lógico se lee RO. La alimentación del circuito es de 5 V, los terminales de transmisión A (Pin 6) y B (Pin 7) son los encargados de establecer la comunicación multipunto entre los diferentes dispositivos.

Las líneas SDA y SCL del protocolo I<sup>2</sup>C son drenador abierto por lo cual manejan una resistencia en *pull-up* estando en un estado lógico alto por defecto, para alternar la escritura y lectura del Max 485 se hace uso de un comparador LM 339 con un voltaje de referencia de 0.6 V, al estar la línea en un nivel superior al de referencia la salida del comparador está en un nivel lógico bajo por lo tanto el Max

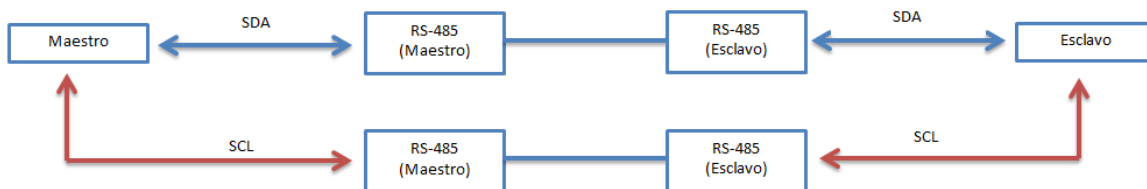


Figura 4. Esquema adaptación de SDA y SCL por medio físico RS-485.

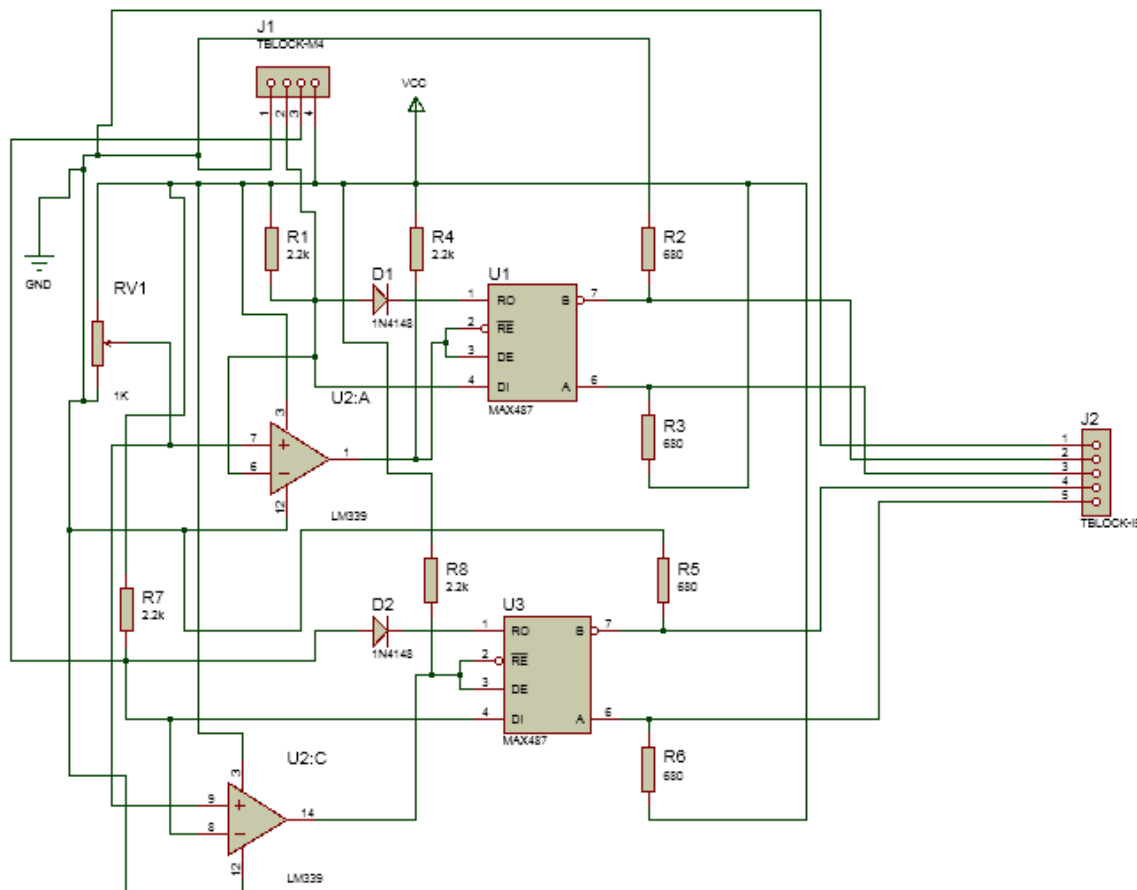


Figura 5. Esquema circuital del módulo RS-485.

485 se encuentra en estado de lectura, en caso contrario el comparador estará en un nivel lógico alto y el Max 485 se encontrará en estado de escritura.

El PSoC trabaja con la familia lógica CMOS esta detecta niveles de tensión bajos en un rango de 0 V-1.5 V y niveles de tensión altos en un rango de 3.5 V-5 V. En vista de esto, se hace uso de un diodo en el terminal RO (Pin 1), lo cual permite que la línea original (Fig. 6) baje a un nivel de 0.7 V en el caso de que reciba un 0 lógico, en caso contrario la línea original estará aislada de la señal recibida, esto permite que el PSoC detecte un cambio en la señal pero sin activar el

comparador y en consecuencia sin transmitir la línea. Cuando la señal original del protocolo aterrice la línea a un nivel menor a 0.6 V se transmitirá la línea por medio del Max 485 permitiendo la comunicación entre los dispositivos (Axelson, 1998).

### Interfaz gráfica Python

Python al ser un software libre brinda la posibilidad a los usuarios de trabajar en diferentes plataformas. Dicho lenguaje se caracteriza por su sintaxis limpia en comparación a otros lenguajes de programación, además de ser manejado

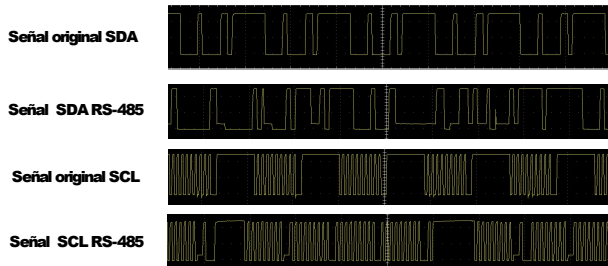


Figura 6. Señales SDA y SCL originales y por medio físico RS-485.

por un intérprete lo que ahorra tiempo y recursos. La versión que se optó a usar es la 3.4 en vista de que está en constante crecimiento. Para el desarrollo de la interfaz gráfica se utiliza Tkinter el cual es un estándar para la interfaz gráfica de usuario (GUI). En él se implementan funciones establecidas para predeterminedar el tamaño de la ventana, botones de usuario, etiquetas de texto, color de texto y fondo, soporta imágenes en formato gif y png además del uso de *messagebox* (Spence, 2014).

El primer paso es la transmisión de datos a través de PySerial la cual es una librería de Python que permite comunicarse serialmente a través de RS-232. Reemplazando el simulador CoolTerm por la interfaz en Python, al realizar las pruebas de transmisión entre el PC y el PSoC (Maestro) se presenta un error al transmitir los datos ya que estos poseen un formato distinto al trabajado en el PSoC (Maestro), por lo cual era incapaz transmitir correctamente el dato. La solución fue codificar el dato enviado por medio de la función `encode('ASCII')` (Liechti, 2015).

Se propone realizar la lectura correspondiente a los datos de cada esclavo como lo son la cuenta de activación, el estado (On/Off) y si el dispositivo está conectado, para esto se realizaron modificaciones del código ya que presentaba errores en la transmisión de datos del PSoC (Maestro) al PC. La solución fue aumentar el tamaño del dato leído en la interfaz. Al recibir los datos los cuales se visualizan en las etiquetas como una cadena de caracteres (formato *string*) y al establecer acciones específicas en función del dato recibido, se hacen notorios varios problemas debido una vez más a la incompatibilidad en el formato de recepción. Después de consultar se utiliza la función `decode()`, la cual permite pasar los datos recibidos tipo byte a cadenas de caracteres, lo anterior es resumido en un diagrama de flujo el cual se puede apreciar en la Fig. 7, dando la posibilidad de usar acciones para cambiar así los colores de las etiquetas, las cuales funcionan como indicadores además del uso de *messagebox* para avisar al usuario los problemas en la conexión del dispositivo (al no estar conectado) y una alerta que informa cuando se debe hacer el mantenimiento al actuador, se incorpora un botón para reiniciar la cuenta de mismo, estas características pueden observarse en la Fig. 8.

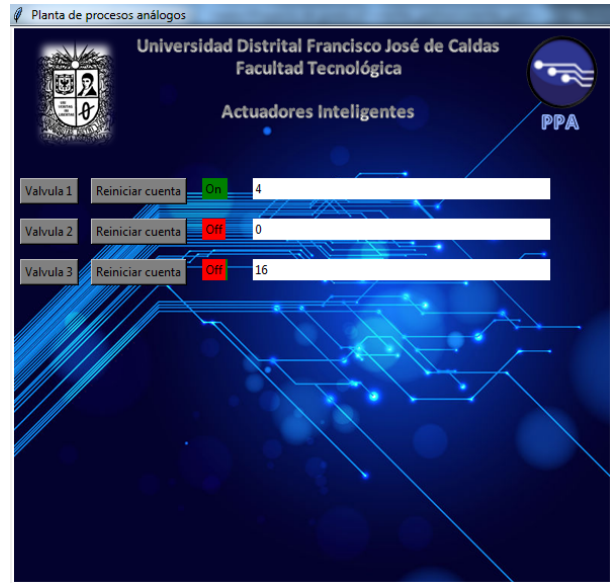


Figura 8. Interfaz gráfica Python.

### Diagrama de bloques

El diagrama de la Fig. 9 describe el funcionamiento del sistema de control exponiendo sus cinco bloques fundamentales.

- Comunicación I<sup>2</sup>C: Protocolo de comunicación encargado de crear una interacción entre el PSoC (Maestro) y los PSoC (Esclavos). El maestro es el encargado de comunicar con el PC, realizando él envío de los comandos y la supervisión correspondiente a los datos recibidos por los esclavos, el sistema se encarga de llevar la cuenta de activación del actuador como su estado (On/Off).
- RS-232: Encargado de la comunicación serial entre el PSoC (Maestro) y el PC.
- EEPROM: Guarda los datos y estado (On/Off) de los actuadores en caso de pérdida en la alimentación del sistema.
- RS-485: Medio físico encargado de comunicar entre los módulos maestro/esclavo.
- Interfaz Python (PC): interfaz gráfica donde el usuario interactúa con el sistema.

### Resultados

Al hacer la conversión del protocolo I<sup>2</sup>C al estándar RS-485, se logra un mayor alcance a las líneas del protocolo, con pruebas realizadas hasta 60 m con un correcto funcionamiento.

RS-485 permite un máximo de 32 dispositivos en sus líneas de comunicación, al hacer la conversión, se puede llegar a un máximo de 120 dispositivos.



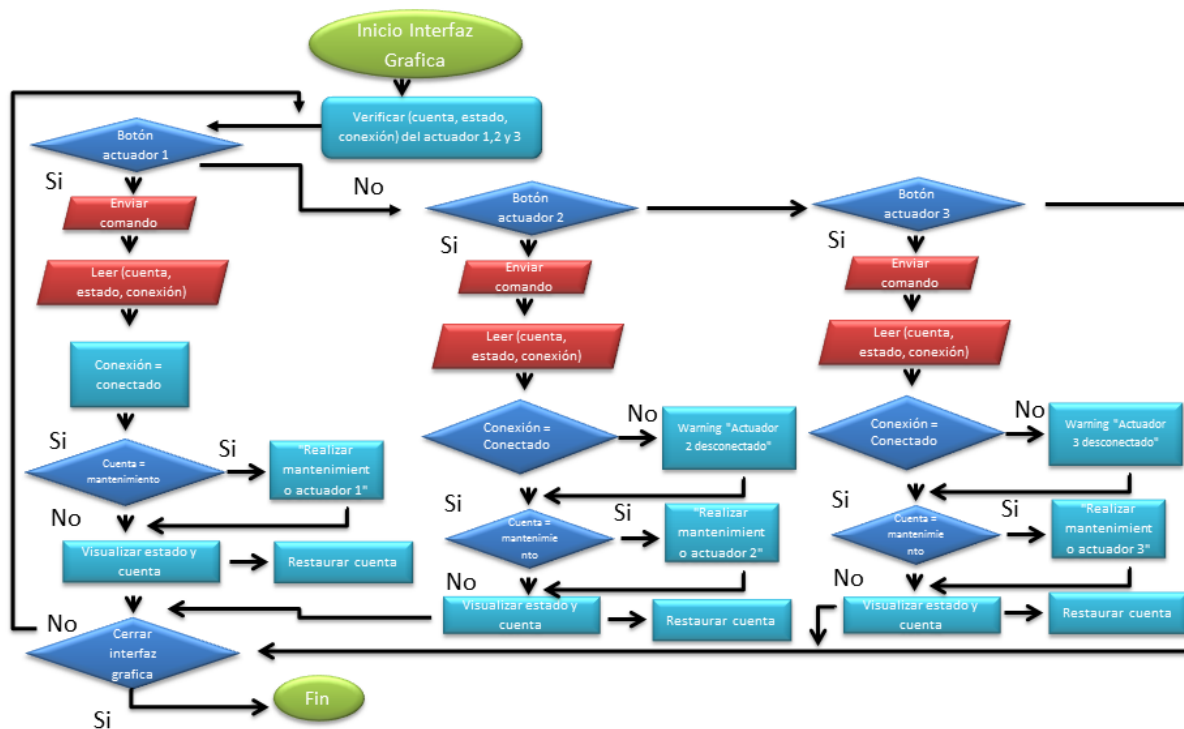


Figura 7. Diagrama de flujo interfaz gráfica Python utilizando el maestro y dos esclavos como actuadores.

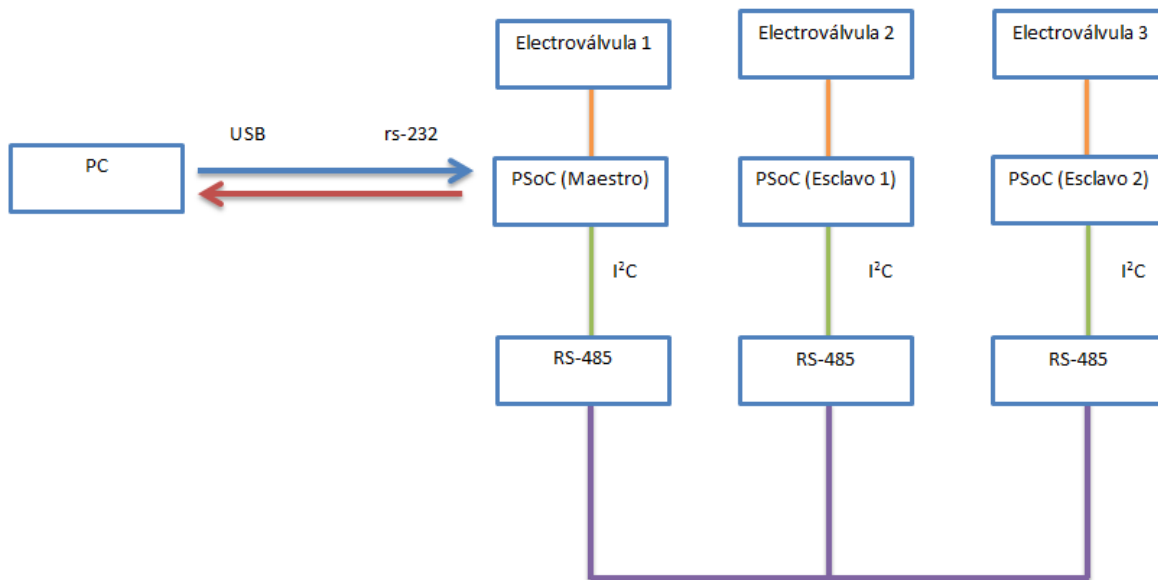


Figura 9. Bloques proyecto actuadores inteligentes con protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y medio físico RS-485.

### Conclusiones

Al transmitir las líneas pertinentes al protocolo (SDA y SCL) se debe realizar un proceso paralelo en ambas líneas de comunicación para asegurar la sincronización debido a

los retardos producidos por la conversión de I<sup>2</sup>C a RS-485, garantizando el correcto funcionamiento del protocolo.

El uso de un bootloader (carga de arranque) en el PSoC 4 para su programación, interfiere directamente con el uso de la EEPROM, por lo tanto se hizo uso del KitProg para la programación del PSoC 5 por SWD (hilo

serial de depuración) permitiendo trabajar la EEPROM sin inconvenientes.

Con el fin de brindar un mayor alcance al protocolo I<sup>2</sup>C se optó por manejar una velocidad de 100 Kbps para transmitir por medio de RS-485, ya que a velocidades mayores presenta un menor alcance en la transmisión y recepción de datos.

A través del uso de la interfaz gráfica desarrollada en Python se puede realizar el control del sistema sin hacer uso de un HMI, permitiendo visualizar las cuentas de activación y monitorear el estado de los actuadores.

## Referencias

- Axelson, J. (1998). *Serial port complete. programing and circuits for rs-232 and rs-485 links and networks.* Lakeview Research.
- Cypress. (2015a). *Eeprom.* (PSoC Creator Component Datasheet)
- Cypress. (2015b). *Psoc 4 serial communication block (scb).* (PSoC Creator Component Datasheet)
- Liechti, C. (2015). *Python serial port extension.* (pySerial's documentation)
- Spence, E. (2014). *An introduction to gui programming with tkinter.* (SciNet HPC Consortium)



# Prototipo de control y monitoreo para parqueaderos vehiculares

*Control and monitoring prototype for vehicle parking*

Carlos I. Córdoba L.

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

Brayan S. Plazas V.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
sttifplazasst@hotmail.com

---

Se implementa un prototipo de control y monitoreo que genera un diagnóstico de la disponibilidad de un parqueadero cubierto simulado con tres plazas de parqueo. El prototipo usa sensores de ultrasonido para tomar muestras del estado en que se encuentra, ya sea ocupado o disponible, a través del protocolo de comunicación SPI, se envían los datos a un micro controlador central, enlazado a un módulo Ethernet envía los datos de las plazas de parqueo a un servidor web, permitiendo la visualización de los datos obtenidos por medio de una interfaz gráfica de la página web y un aplicativo móvil descargable. Dentro de las herramientas de visualización el usuario podrá encontrar: capacidad total del parqueadero, ubicación, tarifa y plazas de parqueo disponible.

*Palabras clave:* Aplicación móvil, comunicación, parqueadero

We implemented a prototype of control and monitoring that generates a diagnostic of the availability of a covered parking with three places of parking. The prototype uses ultrasonic sensors to take samples of the state, either occupied or available, through the SPI communication protocol data is sent to a central micro controller, bound to a Ethernet module sends the data of the parking spaces to a web server, allowing to visualize the data obtained by means of a graphical interface of the web page and a downloadable mobile application. Within the viewing tools the user may find: total capacity of the parking, location, fare and parking places available.

*Keywords:* Communication, mobile application, parking

---

**Tipología del artículo:** Investigación

**Fecha recepción del manuscrito:** Octubre 10, 2014

**Fecha aceptación del manuscrito:** Noviembre 3, 2014

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

**Edición digital:** <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

**Cómo citar:** Córdoba, C., y Plazas, B. (2015). *Prototipo de control y monitoreo para parqueaderos vehiculares*. Revista Tekhnê, 12(1), 67-72.

## Introducción

La composición del parque automotor de la capital colombiana es ocupada por automóviles particulares en más de un 90 %, aumentando la demanda para encontrar un parqueadero disponible en la ciudad. La falta de información sobre parqueaderos circundantes al sector, ocasionan que la búsqueda del mismo se convierta en un caos, llegando a afectar la movilidad y la calidad de vida de los bogotanos, según lo afirman expertos en movilidad (Dangond, Jolly, Monteoliva, y Rojas, 2011; Greiff et al., 2013; Lariza, 2009). Este problema puede ser observado en diferentes puntos de Bogotá al igual que en algunos centros comerciales como lo son Titán Plaza y Plaza de las Américas, donde la espera de un parqueadero en horas de alto flujo vehicular (6 pm a 8 pm) produce un embotellamiento del tráfico.

Con este prototipo se propone una alternativa para mejorar la movilidad en la ciudad, además de esperar la vinculación de varios parqueaderos de orden público y privado a este sistema, logrando generar un impacto en lo que respecta a la movilidad de manera proporcional a la cantidad de parqueaderos vinculados.

Actualmente se han desarrollado tecnologías con diferentes metodologías que permiten el control y el monitoreo de los parqueaderos, sin embargo, los datos de las plazas de parqueo se quedan para los establecimientos sin llegar a hacerse público a los usuarios.

Este proyecto busca comunicar los datos de las plazas de parqueo a los usuarios del sistema, siendo desarrollado en cuatro fases: integración de la sensorica, implementación de los debidos protocolos de comunicación, diseño de página web e integración a un servidor y ensamble.

## Metodología

La Fig. 1 muestra las diferentes etapas y su interrelación.

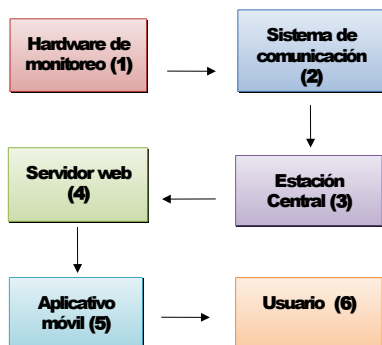


Figura 1. Diagrama de bloques metodología planteada.

### Hardware de monitoreo

Sensa el estado del parqueadero ya sea ocupado o desocupado. Este proceso se realiza a través del HC SR-04.

Este es un sensor de distancias por ultrasonidos, capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra, en un rango de 2 cm a 450 cm, usando una frecuencia de 40 kHz. El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición. Su uso es tan sencillo como enviar el pulso de arranque y medir la anchura del pulso de retorno, usa como medio de propagación el aire sin usar el contacto físico para su funcionamiento.

El estado de la plaza de parqueo, es ilustrado mediante dos LEDs ubicados en el montaje (Rojo - ocupado y Verde - desocupado), los cuales son visibles para los usuarios dentro de las instalaciones del parqueadero. Sin embargo, el estado compilado de las plazas de parqueadero se puede visualizar por medio del aplicativo móvil y la página web. El sensor es implementado en una caja de acrílico (Fig. 2), junto al montaje mínimo para el chip Atmega 328pu (Arduino) (Fig. 3) para enviar los datos de las plazas de parqueo a un micro-controlador central.

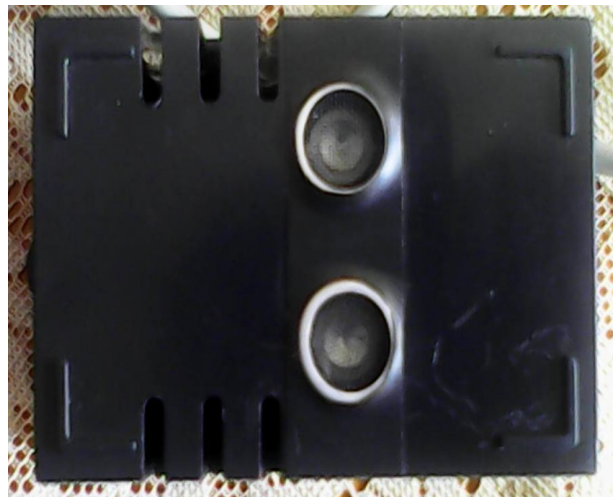


Figura 2. Encapsulado del sensor HC SR-04 en caja de acrílico.

### Sistema de comunicación

Se encarga de codificar la información, estableciendo una comunicación entre el hardware de monitoreo y una estación central. Esto se hace mediante el protocolo de comunicación SPI, el cual funciona mediante la metodología de Maestro-Esclavo. La estación central (Maestro) se conecta con las dos líneas a los sensores (Esclavos), el maestro hará un barrido cada 30 segundos, llamando esclavo por esclavo, generando que estos envíen al maestro el estado de la plaza de parqueo, Ocupado/Desocupado, este protocolo permite comunicación hasta con 125 dispositivos, los datos obtenidos por el mando central se envían por medio de un módulo Ethernet al servidor web.

A continuación se presenta el diseño completo a nivel de hardware (Etapa 1 y 2) donde se ilustra el montaje

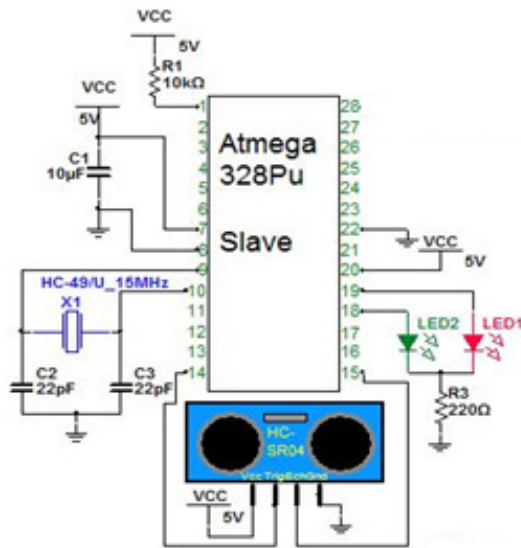


Figura 3. Montaje mínimo del microcontrolador con sus respectivos sensores.

desarrollado y la comunicación del SPI entre esclavos y maestro (Fig. 4).

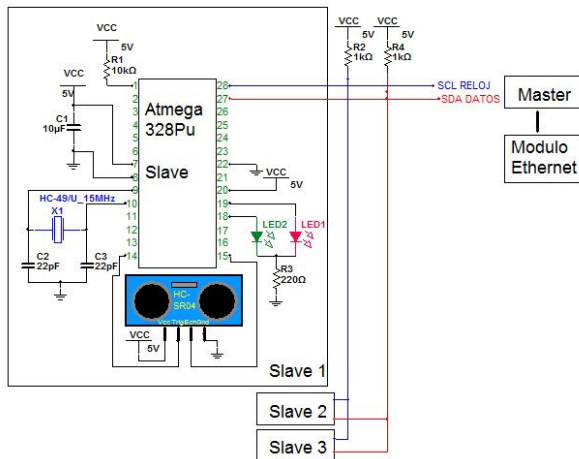


Figura 4. Montaje del sistema de comunicación SPI.

### Servidor central

Provee y almacena datos, que son recibidos a través del módulo Ethernet, permitiendo la visualización de los mismos desde una página web y un aplicativo móvil descargable. Esto se logra mediante un servicio de hosting gratuito compuesto por un servidor Apache 2.2.27 con soporte MySQL 5.5.40-cll y PHP 5.4.27. Este es controlado por Cpanel y las bases de datos desde phpMyAdmin (Fig. 5). La base de datos no hace parte del *hosting*, sino que es un

servicio de freesqldatabase que ofrece un acceso remoto a las bases de datos. Este es usado para conectarse al servidor y al micro-controlador central. Estos datos se suben mediante el script `iot.php` y para mostrar la tabla se hizo un script AJAX y conexión remota a SQL de la base de datos remota.

### Página web

La página web:

<http://easyparking.holo.so/Index%20of%20/>

recibe los datos del servidor central y los visualiza a los usuarios de manera ordenada, en una interfaz gráfica amigable al usuario mostrando dirección, tarifa, cupo total, actualización y parqueaderos disponibles de manera que el usuario pueda recibir de mejor manera la información.

### Aplicativo móvil

Es un programa informático usado en dispositivos de última generación como tabletas y celulares, que podrá ser descargado gratuitamente por el usuario brindando toda la información relacionada con el parqueadero. El aplicativo se desarrolla en App Inventor 2, desarrollado por Google y establecido legalmente por el MIT, contando con dos opciones, en la primera el usuario podrá visualizar las plazas de parqueo disponibles, en el parqueadero seleccionado, en la segunda opción el usuario encontrará un menú desplegable con la información necesaria para poder encontrar un parqueadero con disponibilidad, se brinda información de las localidades, la disponibilidad y la dirección (Fig. 6). La aplicación es de fácil manejo.

### Usuario

Finalmente el usuario recibe la información acerca de la ubicación de un parqueadero disponible según los requerimientos del mismo, con esto se contribuye a mejorar la movilidad, evitando pérdidas de tiempo y descongestión en vías aledañas.

### Resultados

Dentro de todo el proceso de elaboración del proyecto se desarrollaron diversas pruebas para poder llegar al prototipo final. En principio y de forma cronológica mencionaremos las pruebas y cambios realizados durante el desarrollo del proyecto.

### Hardware de monitoreo

Inicialmente se implementó un sensor óptico CNY70. Sin embargo, tenía varios inconvenientes como variaciones en presencia de luz y de colores oscuros, además de la necesidad de tener que situarlo muy próximo al automóvil para detectarlo de manera óptima, alterando la medición y



Figura 5. Interfaz del servidor web Cpanel y phpMyadmin.

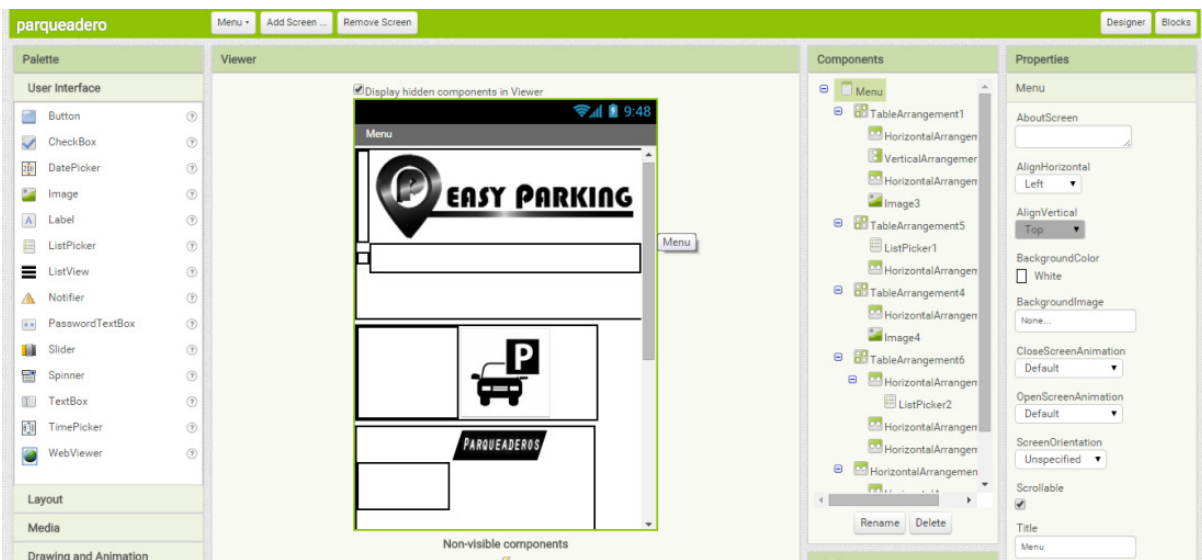


Figura 6. Diseño del aplicativo móvil.

los datos obtenidos, ya que, en ocasiones el sensor mostraba datos erróneos.

Por ende, hubo necesidad de indagar por un sensor que no mostrara variaciones en presencia de los fenómenos anteriormente mencionados. Como resultados encontramos varias tecnologías que podían suplir esta necesidad, una de ellas fue la RFID (identificación por radiofrecuencia),

es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que usa dispositivos denominados etiquetas, sin embargo, el uso de esta tecnología es poco accesible en Colombia aumentando los costos, y adicionalmente, como es una identificación por radiofrecuencia, cualquier dispositivo emisor de señal que estuviera a la misma frecuencia alteraría el sensado.

Otra opción fue un sensor de presión, pero este no fue fructífero debido a sus costos y al desgaste presente al soportar el peso del vehículo disminuyendo su vida útil. Finalmente se optó por un sensor de ultrasonido que en condiciones iguales, tenía un mejor comportamiento en cuanto a la variación, costos, desgaste e interferencia. El sensor se encapsulo en una caja de acrílico con soportes, lo cual permite que sea instalado en el techo de la plaza de parqueo, realizando la detección del vehículo a través de su parte superior, con lo cual, el sensor esta calibrado para funcionar como se muestra en la Fig. 7.

A pesar de este cambio se presentaba un fenómeno de interferencia entre sensores causando que se transmitiera ruido entre sensores en lapsos cortos (sobre cuando se presentaban cambios de estado), este problema se presentaba principalmente cuando los sensores se encontraban a una distancia menor a 30 cm entre ellos y también se presentaba cuando se acercaba el objeto a censar (el automóvil) a una distancia menor de 10 cm del sensor. Estos problemas se pudieron solucionar estabilizando la comunicación, y simplemente instalando los sensores en el techo de la plaza de parqueo garantizando que la distancia entre estos sea mayor a los 10 cm de error del sensor permitiendo así un funcionamiento óptimo.

### **Sistema de comunicación**

En principio no se manejó bajo ningún protocolo de comunicación, lo que consumía bastante recursos del microcontrolador, ya que cada sensor ocupaba un pin de entrada del mismo, limitando el número de sensores y la velocidad de transmisión. Por ende, el sistema de comunicación sufrió un pequeño cambio en su estructura, pensando en una masa amplia de plazas de parqueo, en minimizar el cableado y optimizar los recursos del microcontrolador, por lo cual se usó el protocolo de comunicación SPI.

Como los sensores eran vulnerables a interferencias, se optó por estabilizar más la comunicación entre sensores para evitar al máximo la infiltración del ruido. Esto se logró a través de dos resistencias de 1 k $\Omega$  entre la alimentación y las dos líneas de comunicación. Esto redujo notablemente el ruido.

### **Servidor central**

Inicialmente se pensó instaurar una base de datos local, a través de un ordenador de placa reducida Raspberry Pi conectada a un módem. Sin embargo, limito el uso de los datos a las red local a la que fuera conectada, generando conflicto al enlazarse con la página web, impidiendo la visualización de los datos. Pensando en este conflicto se implementó un servicio de hosting gratuito on-line compuesto por un servidor Apache versión 2.2.27 soportado por Mysql5.5.40-cll y PHP 5.4.27., garantizando

la visualización de los datos en la página web, almacenando de manera cronológica los datos. Para la implementación de este servicio fue necesario añadir al sistema de comunicación un módulo Ethernet que es el encargado de subir lo datos al servidor.

El hosting gratuito finalmente limito mucho la implementación de esta tecnología, su seguridad era muy baja al igual que su estabilidad. Finalmente se alquiló un hosting pago, entre las ventajas de este se obtuvo un control total sobre el sitio web, se suprimió la publicidad, soporte técnico y una conexión permanente y sin interrupciones.

### **Conclusiones**

Se desarrolló el hardware de monitoreo, implementando un sensor de ultrasonido HC SR04, con dos resistencias de 1 k $\Omega$  entre las líneas de comunicación y la línea de alimentación garantizando un correcto sensado. Los datos obtenidos por el sensor pueden ser visualizados de tres maneras, virtual a través de la página web y el aplicativo móvil o física mediante LEDs en el montaje final del sensor (luz roja ocupada, luz verde disponible).

Se implementó un sistema de comunicación entre el hardware de monitoreo y el servidor central, mediante el protocolo de comunicación SPI, conectando tres sensores a un microcontrolador central, permitiendo una velocidad de transmisión de 9600 baudios suficiente para identificar el estado de las plazas de parqueo y garantizando la correcta transmisión de los datos, todo ello optimizando los recursos del microcontrolador central, teniendo en cuenta que solo requiere un pin de entrada. Permitiendo en un futuro establecer una correlación entre una cantidad alta de sensores, reduciendo la complejidad en la conexión física de los mismos, repercutiendo favorablemente en los costos de la instalación y mantenimiento del sistema.

Se entabló un conexión exitosa entre el hardware de monitoreo y el servidor web, a través de un módulo Ethernet, permitiendo un almacenamiento de los datos de las plazas de parqueo para ser visualizados en un página web, con una interfaz gráfica amigable y sencilla (Fig. 8), donde el usuario podrá identificar y seleccionar el parqueadero de preferencia, obteniendo todos los datos del mismo.

Se implementó un aplicativo móvil el cual permite visualizar los datos de las plazas de parqueo provenientes del sistema de sensado, proporcionándole al usuario identificar dirección, horario, tarifa, cupo y lugares disponibles de cada plaza de parqueo desde un lugar remoto, simplemente teniendo acceso a Internet ya sea desde su plan de datos o por medio de Wi-Fi.

### **Referencias**

Dangond, C., Jolly, J., Monteoliva, A., y Rojas, F. (2011). Algunas reflexiones sobre la movilidad urbana en

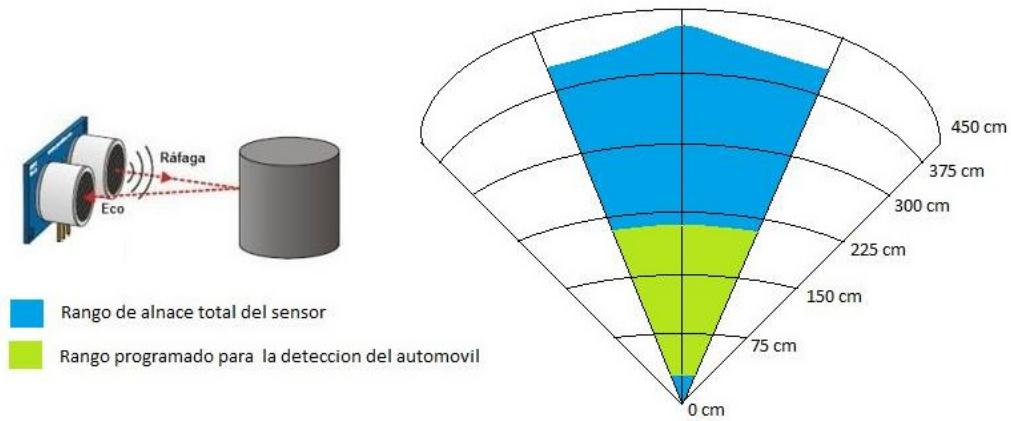


Figura 7. Rango de detección del sensor.

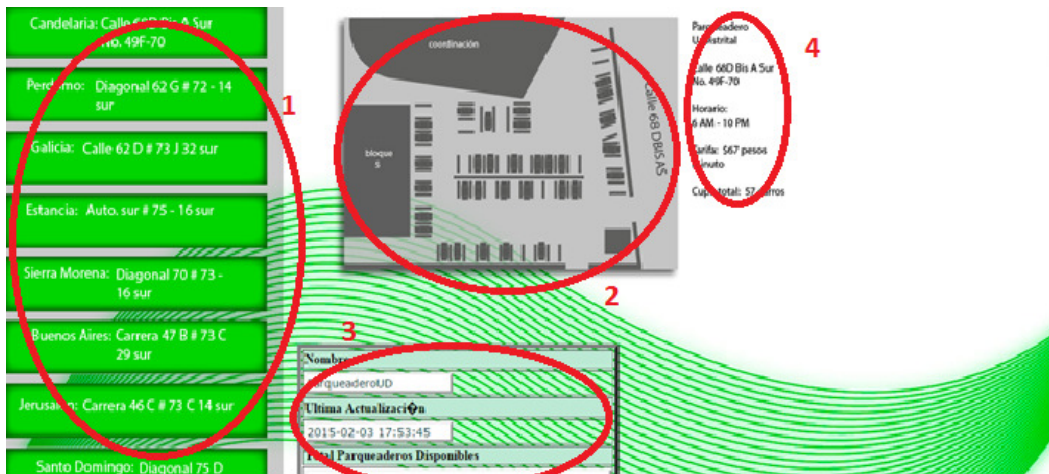


Figura 8. Ilustración de la interfaz de la página web.

1. Submenú de parqueaderos aledaños al parqueadero seleccionado.
2. Diagrama del parqueadero.
3. Plazas de parqueo disponibles.
4. Información general del parqueadero.

colombia desde la perspectiva del desarrollo humano.  
*Papel Político*, 16(2), 485-514.

Greiff, M., Díaz, J., Bernal, P., Garzón, L., Salazar, W., Tinjacá, N., y cols. (2013). Observatorio de movilidad.

*Reporte Anual de Movilidad*, 6. (Cámara de Comercio de Bogotá. Universidad de los Andes)

Lariza, P. (2009). *Los parqueaderos y bogotá*. (El Tiempo)





# 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 julio 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.

### 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, 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  $\text{\LaTeX}$ , se deben remitir todos los archivos fuente.

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 en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información de autores. El formato de información de autores se puede descargar de la página web de la revista. 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.
- 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.

## 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 July 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.

### 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 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.

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 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 in digital form, attaching the presentation letter and the authors information format. The authors information format can be downloaded from the website of the journal. 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.
- Certification of the originality and novelty of the article.
- Exclusivity of submission to *Tekhnê* journal.
- Confirmation of authorship with the signature of all authors.

## 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>