Tekhnê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 13 No. 1
Enero - Junio de 2016
ISSN 1692-8407

T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volumen 13 - Número 1 - 2016
ISSN 1692-8407

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA

Editor

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

Comité editorial

⇀ **Interno:**

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

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

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

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

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

⇀ **Científico:**

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

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

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

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

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

Árbitros

M.Sc Frank Giraldo Ramos
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Andrés Escobar Díaz
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D Clara Inés Buritica Arboleda
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

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

Cubierta: Oberbaum Bridge (German: Oberbaumbrücke), Berlin (Alemania)
Autor: Fredy H. Martínez S.

Contracubierta:
⊙ Superior izquierda: Señales PWM complementarias (tiempos muertos) (Soto, W. y Lara, M.)
⊙ Superior derecha: Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético (Amado, J., Garay, C. y Martínez, F.)
⊙ Centro: Curva del transductor con carga (Soto, W. y Lara, M.)
⊙ Inferior izquierda: Modelo CAD (Cuesta, D., y Huerfano, J.)
⊙ Inferior derecha: Prototipo final (Cadena, A., Peña, E. y Martínez, F.)

Corrección de estilo español

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

Corrección de estilo inglés

Andrea Castiblanco Ortiz

Impresión

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Formato 21.5 × 28 cm
Papel Bond 75 g
Tiraje de 70 ejemplares

Revista Tekhnê

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

Periodicidad

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

Misión

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

Público objetivo

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

Forma de adquisición

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

Suscripción

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

Reproducción

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

Dirección postal

Prof. Fredy H. Martínez S.
Editor y director revista Tekhnê
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 301
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A-35 sur
Teléfono: (571) 3238400 Ext. 5003
Celular: (57) 3005585481
Bogotá D.C., Colombia
E-Mail: tekhneud@udistrital.edu.co
Url: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index

T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Volume 13 - Number 1 - 2016
ISSN 1692-8407

DISTRICT UNIVERSITY
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
TECHNOLOGICAL FACULTY

Editor

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

Editorial committee

⇀ **Inner:**

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

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

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

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

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

⇀ **Scientific:**

Ph.D José Javier Padilla 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 Frank Giraldo Ramos
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

M.Sc Andrés Escobar Díaz
District University Francisco José de Caldas (Colombia)

Ph.D Clara Inés Buritica Arboleda
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

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

Cover picture: Oberbaum Bridge (German: Oberbaumbrücke), Berlin (Germany)
Autor: Fredy H. Martínez S.

Back cover picture:
⊙ Top left: Señales PWM complementarias (tiempos muertos) (Soto, W. y Lara, M.)
⊙ Top right: Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético (Amado, J., Garay, C. y Martínez, F.)
⊙ Middle: Curva del transductor con carga (Soto, W. y Lara, M.))
⊙ Lower left: Modelo CAD (Cuesta, D., y Huerfano, J.)
⊙ Lower right: Prototipo final (Cadena, A., Peña, E. y Martínez, F.)

Style correction in spanish

Sonia Patricia Villamizar Castellanos

Style correction in english

Andrea Castiblanco Ortiz

Printed by

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

Tekhnê Journal

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

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 adquisition

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
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 confluyan 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 publish and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

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

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.
Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

Relations with owners and journal editors

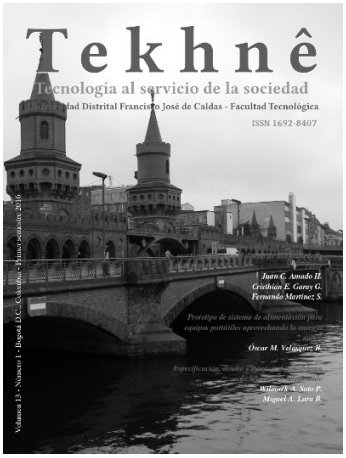
The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. ***Tekhnê*** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal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

Conflict of interest

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

Complaints/allegations

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



Volumen 13 - Número 1 - 2016
ISSN 1692-8407

Índice

I **Declaración de ética y buenas prácticas** **6**

II **Code of ethics and good practice** **8**

III **Editorial** **11**

IV **Artículos** **13**

1. Desarrollo de prototipo de quadrotor con sistema de comunicación inalámbrica bidireccional
Andrés F. Cadena F.
Edwin E. Peña P.
Fredy H. Martínez S. **13**

2. Implementación de un algoritmo de morfogénesis para el diseño de disipadores de calor
Juan C. Amado H.
Cristhian E. Garay G.
Fernando Martínez S. **31**

3. Prototipo de sistema de alimentación para equipos portátiles aprovechando la energía eólica
Óscar M. Velásquez B. **41**

4. Especificación, diseño y montaje de un sistema de lavado por ultrasonido
Wilmark A. Soto P.
Miguel A. Lara B. **57**

5. Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL
Diego N. Cuesta C.
Jeison R. Huerfano G. **73**

V **Instrucciones para los autores** **83**

VI **Instructions for authors** **85**

Editorial

El pasado 29 de marzo el Consejo Académico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas declaró para la institución el año 2016 como el *Año del Sabio Caldas*. El prócer de la independencia de Colombia Francisco José de Caldas y Tenorio es recordado en la memoria del país como un gran científico, militar, geógrafo, botánico, astrónomo, naturalista, periodista y politólogo (el primero para muchos historiadores), razón por la cual se le llama *sabio*. Estos mismos son los atributos que la Universidad Distrital pretende caractericen e identifiquen a su comunidad académica.

Última versión del billete de 20 pesos con el cual el Banco de la Republica rindió homenaje a la vida y obra del sabio Caldas.

El 28 de octubre de 2016 se cumplen 200 años del fusilamiento del prócer. Es por esto que la Universidad Distrital programa para este mes una gran cantidad de actividades que pretenden por un lado recordar la vida y obra del sabio, y por otro lado, festejar ese espíritu que inspira a la institución tanto académicamente como a nivel humano y social. Entre estas actividades se proponen charlas, paneles, talleres y actividades lúdicas en donde se busca resaltar los logros científicos, académicos y sociales de la Universidad Distrital. Claro esta que no podría faltar la participación de la familia del sabio Caldas en esta celebración, por lo que entre las actividades se planea una charla con uno de sus descendientes actuales. Paralelo con estas actividades, en otra parte de la ciudad, en la Biblioteca Luis Ángel Arango, también se celebran los 200 años con otro evento. Entre el 27 y 29 de octubre la biblioteca será sede del *Congreso Internacional Bicentenario Francisco José de Caldas 1768-1816*, evento organizado por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y que también cuenta con apoyo de la Universidad Distrital. Será un punto de encuentro para recordar aspectos de la vida y la obra del sabio Caldas que nuevamente inspire a los colombianos, porque al final de cuentas, Colombia si necesita de sabios!

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

On March 29 the Academic Council of the District University Francisco José de Caldas, for the institution declared 2016 as the *Year of Caldas sage*. The hero of the independence of Colombia Francisco José de Caldas and Tenorio is remembered in the country's memory as a great scientist, military, geographer, botanist, astronomer, naturalist, journalist and political scientist (the first for many historians) which is why he is called *sage*. These are the same attributes that the District University intends to characterize and identify in its academic community.

Latest version of the 20 pesos bill with which the Bank of the Republic paid tribute to the life and work of the Caldas sage.

October 28, 2016 marks the 200th anniversary of the execution of the hero. That is why the District University schedule this month a lot of activities aimed on the one hand to remember the life and work of the sage, and on the other hand, celebrate the spirit that inspires the institution both academically, human and social level. These activities include lectures, panels, workshops and recreational activities which seek to highlight the scientific, academic and social achievements of the District University. Of course that could not miss the participation of the Caldas sage family in this celebration, so that among the activities the University is planning a talk with one of their descendants. Parallel with these activities in another part of the city, in the Luis Ángel Arango Library, are also celebrated the 200th anniversary with another event. Between 27 and 29 October the library will host the *International Congress Bicentennial Francisco José de Caldas 1768-1816*, organized by the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, which also has the support of the District University. The event will be a meeting point to remember aspects of the life and work of the Caldas sage that inspire Colombians again, because in the end, Colombia does need sages!

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

Revista Tekhnê
Enero - Junio 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 13– 30
© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Desarrollo de prototipo de quadrotor con sistema de comunicación inalámbrica bidireccional

Quadrotor prototype development with bidirectional wireless communication system

Andrés F. Cadena F.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
afcadenaf@correo.udistrital.edu.co

Edwin E. Peña P.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
eepenap@correo.udistrital.edu.co

Fredy H. Martínez S.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
fhmartinezs@udistrital.edu.co

Este artículo presenta el diseño, implementación, construcción y evaluación de un prototipo quadrotor. Este prototipo cuenta con una amplia variedad de componentes. En el desarrollo, se da a conocer cada uno de ellos, junto con una metodología de trabajo paso a paso del proceso. El sistema de comunicación utiliza un equipo emisor comercial, el cual permite controlar el quadrotor. Gracias al comportamiento del prototipo en sus pruebas iniciales, fue posible su re-diseño y ajuste, incrementando su estabilidad y desempeño en vuelo. Los resultados finales se detallan en la evaluación de desempeño, describiendo los comportamientos del prototipo.

Palabras clave: Aeronave no tripulada, modelado, prototipado, quadrotor

This paper presents the design, implementation, construction and evaluation of a prototype quadrotor. This prototype has a wide variety of components. In the development, it is given to know each of them, along with a step by step process methodology. The communication system uses a commercial transmitting device, which allows to control the quadrotor. Thanks to the performance of the prototype in its initial tests, it was possible to re-design it and adjustment, it to increase its stability and performance in flight. The final results are detailed in at the performance evaluation, describing the behaviors of the prototype.

Keywords: Modeling, prototyping, quadrotor, unmanned aircraft

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016
Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756
Cómo citar: Cadena, A., Peña, E. y Martínez, F. (2016). *Desarrollo de prototipo de quadrotor con sistema de comunicación inalámbrica bidireccional*. Revista Tekhnê, 13(1), 13-30.

Introducción

En los últimos años se ha buscado la manera adecuada para el mejoramiento de los vehículos aéreos, como respuesta a la búsqueda de una forma eficiente y económica para el monitoreo de grandes ambientes no estructurados. Estos vehículos están compuestos normalmente por cuatro rotores dirigidos hacia arriba, y se colocan de forma cuadrada a una misma longitud del centro del prototipo (Fatan, Sefidgari, y Barenji, 2013). Tienen en general una gran ventaja de maniobrabilidad frente a otros esquemas debido a su dinámica, consistente en un sistema de cuatro entradas (balance, cabeceo, guiñada y acelerador) (Gupte, Mohandas, y Conrad, 2012). Lo más importante de un quadrotor es el control que necesitan cuando son sometidos en diferentes tipos de ambientes, en el cual durante los vuelos autónomos consiste en diferentes variables como la posición, velocidad y orientación. Esto se logra mediante los sensores que incorporan y una adecuada localización y desarrollo de la tarea de monitoreo, algunos de estos prototipos se diseñan con cámaras integradas como elemento sensor abordo (M. Achtelik, Zhang, Kuhnlenz, y Buss, 2009). Con ellos pueden construir mapas de navegación en ambientes desconocidos o identificar marcas específicas. Sin embargo, estas cámaras pueden sensar diferentes rangos del espectro, o incluso monitorear espectros específicos (infrarojo, etc.).

Existen aplicaciones para estos prototipos los cuales la mayoría son conocidos como drones, hay dos tipos, de forma de avión y forma de helicóptero o cuadricóptero, una de ellas es el UAV Fulmar (su rampa de lanzamiento que funciona como una ballesta) es un modelo a pequeña escala (aproximadamente de 3,1 metros) y de 19 kilos de peso que puede volar a 3.000 metros de altitud y alcanzar los 150 kilómetros por hora, con una autonomía de 8 horas que le permitiría recorrer hasta 800 kilómetros sin restablecer combustible, como aplicación a este Fulmar remite imágenes, video y sistemas de vigilancia marítima como radares, ya que brinda información desde sus diferentes puntos de vuelo.

En aplicaciones más especificas pueden ser, drones que vigilan volcanes (mitigar los riesgos ambientales para las personas que viven cerca a los volcanes). Otra aplicación vista para el sector eléctrico es la vigilancia de la generación eólica, se encarga de la inspección de palas aerogeneradores que se pueden encontrar a unos 100 metros de altura, tal que por medio de sus cámaras y sensores permiten analizar las necesidades de reparación de los molinos. Como una última aplicación, en aeropuertos se da por un avión disfrazado de pájaro para patrullar en aeropuertos, este consiste en un lanzamiento a mano y gracias a su propulsión eléctrica se desplaza en silencio como un gran depredador aéreo. Estas características hacen que sea un aparato interesante para ahuyentar a los pájaros que pueden poner en peligro la seguridad de los vuelos en los aeropuertos.

A nivel nacional la tecnología UAV también se emplea, a mediados del año 2009 el ministerio de la defensa de este país (Colombia), anunciaba la destinación de sumas cercanas a los US 25.000.000 millones de dólares, con el objeto de adquirir vehículos aéreos no tripulados para destinarlos a la lucha contrainsurgente, antiterrorista y antinarcóticos y evaluando propuestas estadounidenses, europeas e israelíes. Para el año 2005, la fuerza aérea adquirió un vehículo del tipo Vtol (Vertical Take Off and Landing) a la compañia Neural-Robotics, fue destinado a la vigilancia de bases aéreas.

El balance del quadrotor permite que los motores no presenten demasiada vibración, ya que con una menor vibración es mas eficiente el prototipo. En cuanto a las hélices, ellas se balancean en una superficie que no le impongan su movimiento, y así mirar que las hélices queden en una forma horizontal y estable. El cabeceo se produce modificando el ángulo de ataque de las palas o la inclinación del rotor principal. La guiñada básicamente es una rotación respecto al eje vertical del sistema producida por la dirección que se le ejerce, y el acelerador permite controlar la velocidad que se desea en sus tareas, esta parte es fundamental, ya que por medio de esto se controla el prototipo.

Estas máquinas al tener una estructura mecánica abierta, brinda la posibilidad de incorporarle diferentes componentes (ademas de las componentes necesarias para su funcionamiento), como puede ser LEDS que formen una figura de noche en su vuelo o aparatos lumínicos que hagan mas fácil su identificación en vuelos nocturnos. Al tener una plataforma libre permite una mayor profundidad de investigación en diferentes aplicaciones que tienen los vehículos aéreos autónomos, como por ejemplo búsqueda y rescate en lugares de difícil acceso, inspección en la industria, constante monitoreo en lugares amplios y que no se tiene personal continuamente.

Uno de los principios de diseño más importante de éste tipo de sistemas es su minimalismo estructural, lo que impacta directamente su diseño y costo final. El diseño de estos sistemas aéreos busca reducir costos por medio de una construcción mecánica pequeña. Esto se ha desarrollado a través de los años para que todas las personas puedan disfrutar de un prototipo, o para diferentes modelos de construcción.

Ya para hablar de la tecnología que facilite la maniobrabilidad y comunicación con el prototipo, se han desarrollado aplicaciones de control a distancia por medio de los teléfonos Android (realmente cualquier sistema micro-procesado que soporte este OS, como es el caso de los Embedded Hardware Development Kit que posee el proyecto curricular). Esto se logra

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

mediante el uso de pequeños transmisores en el quadrotor conectados a un software específico, por ejemplo SLAM, sistema desarrollado por el MIT's Robust Robotics Group, University of Washington, e Intel Labs Seattle (Chen et al., 2013). En cuanto al diseño estructural, normalmente se consideran las condiciones de operación para definir su perfil operacional. Estos sistemas pueden enfrentar diferentes ambientes, como por ejemplo vientos fuertes. La estructura debe permitirle al sistema equilibrase nuevamente. Es posible equiparlos también con un sistema GPS que ayude tanto en el vuelo como en la planeación del movimiento (M. C. Achtelik, Stumpf, Gurdan, y Doth, 2011).

Este proyecto de investigación busca diseñar, construir e implementar un quadrotor soportado en la experiencia de investigaciones actuales, que permita futuras investigaciones específicas en control y planeación de movimiento. Se espera que éste tipo de desarrollo tenga un impacto directo sobre la industria, el hogar, y genere beneficios en aplicaciones de monitoreo específico. Este vehículo no tripulado tiene la ventaja de ser muy eficaz en zonas que requieren constante monitoreo e inspección, al ser un vehículo no tripulado no se arriesgan vidas humanas en caso de accidente o fallas técnicas, tiene un alto desempeño y un bajo costo (Morar y Nascu, 2012). Basándonos en los artículos investigados los aspectos como su estructura mecánica, la comunicación a distancia y el diseño de un sistema de seguridad contra posibles colisiones bajo prueba se hará teniendo en cuenta los artículos (Chen et al., 2013; Gaponov y Razinkova, 2012; Gupte et al., 2012; Morar y Nascu, 2012; Sa y Corke, 2012).

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

Formulación del problema

El proyecto se centra en el diseño y la implementación de un prototipo quadrotor en el cual puedan en posteriores trabajos, seguir experimentando diferentes funciones de control y navegabilidad. El quadrotor, quadrirotor, o cuadricoptero como también se le conoce, es un sistema robótico conformado por cuatro rotores que permiten su suspensión en el aire para ser maniobrado de forma como lo requiera el usuario.

El cuadricoptero debe ser lo suficientemente estable, rígido, ligero y resistente para trabajo seguro, lo cual también establece una adecuada aerodinámica. Además, requiere de una buena capacidad de almacenamiento de energía (rendimiento del prototipo) sin aportar un peso excesivo. Este proyecto se enfoca al diseño y construcción de un prototipo aéreo a escala mediana (del orden de los cm) para futuras aplicaciones prácticas en navegación.

Se demostrará que el prototipo tenga una suspensión en el aire con un movimiento vertical controlado por una emisora a grandes distancias. Como principal función en la universidad es que estará disponible para proyectos de grados futuros y será de innovación a los estudiantes para demostrar el interés a trabajar en prototipos relacionados, que apoye al mismo quadrotor y aún así pueda realizar diferentes tareas con el apoyo de varios prototipos.

Perfil funcional

Un quadrotor es un vehículo aéreo cuya fuente de propulsión son sus cuatro motores los cuales están ubicados de manera simétrica en los extremos de una estructura en forma de cruz, en el centro de esta estructura se encuentra el sistema electrónico necesario para lograr controlar por medio del transmisor el quadrotor y así conseguir su estabilidad y despegue vertical a través del balance en las fuerzas ejercidas por los motores y hélices, esto lo hace perfecto para múltiples aplicaciones.

El quadrotor será una herramienta de investigación y desarrollo de estrategias de vuelo más eficientes, su uso será en interiores y espacios reducidos donde el vuelo no es afectado por perturbaciones externas aunque no se descarta que pueda ser utilizado en exteriores bajo ciertas restricciones, encontramos adecuado tener un tamaño final de baja escala de aproximadamente 44 cm, medidos de motor a motor en diagonal.

Debido a la complejidad para el desarrollo de un control de buenos resultados, el quadrotor solo tendrá un esquema básico para obtener un despegue vertical que alcanzará una altura como mínimo de 100 cm aproximadamente sin peligro de alguna colisión o perdida de estabilidad en el aire, para esto el esquema básico de vuelo deberá conocer orientación, posición y velocidad del prototipo, para obtener estos datos contará con unos sensores inerciales incluidos en la tarjeta de control(giroscópio, acelerómetro, etc), el prototipo completo va ser controlado por medio de un sistema de comunicación inalámbrico encargado de recibir y enviar las ordenes para el despegue vertical y el aterrizaje.

Modelo matemático

El modelo matemático describe por medio de un conjunto de ecuaciones el comportamiento del sistema físico de la aeronave, este sistema va tener como entradas las tensiones aplicadas a los cuatro motores brushless y como salidas se obtendrá las posiciones y velocidades en los seis grados de libertad del quadrotor, es decir que la representación matemática del sistema puede ser usada para así saber la posición y orientación de quadrotor. La respuesta del

quadrotor es determinado por las velocidades de cada uno de sus cuatro motores, entonces dependiendo que motores giren más rápido el quadrotor se moverá en una dirección y orientación diferente (Ollervides, Dzul, Sáenz, y Santibánez, s.f.). Las hélices de los motores 2 y 4 giran en sentido horario, mientras que las hélices de los motores 1 y 3 giran en el sentido opuesto. Esto resulta en una cancelación de efectos giroscópicos y torques aerodinámicos en estado de vuelo compensado (Fig. 1).

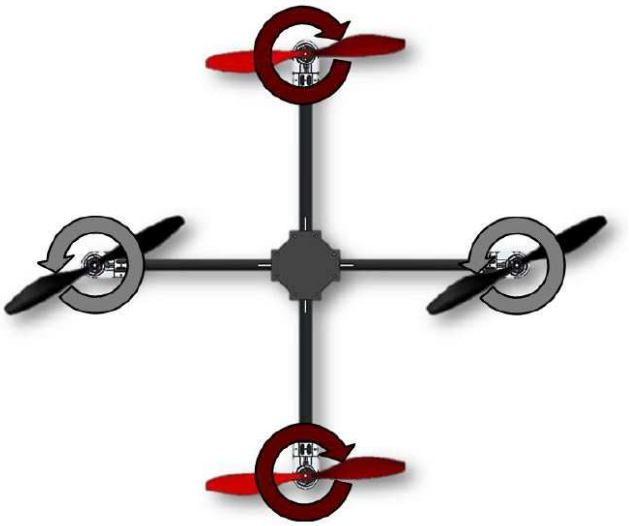


Figura 1. Vuelo estacionario (Jaramillo y Gómez, 2013).

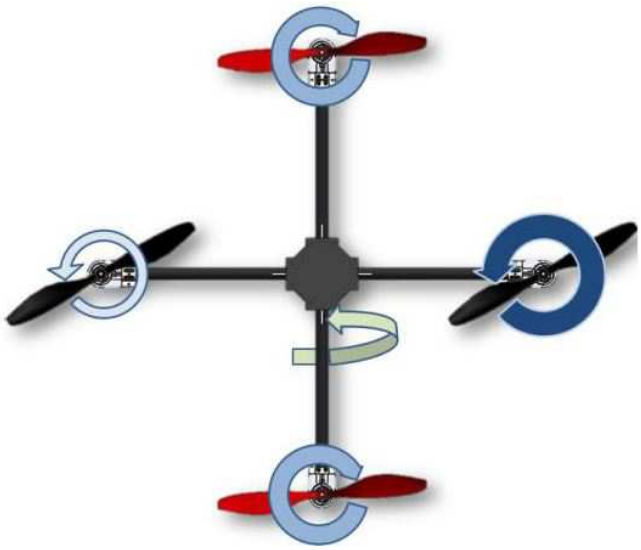


Figura 2. Movimiento de rotación (Pitch) (Jaramillo y Gómez, 2013).

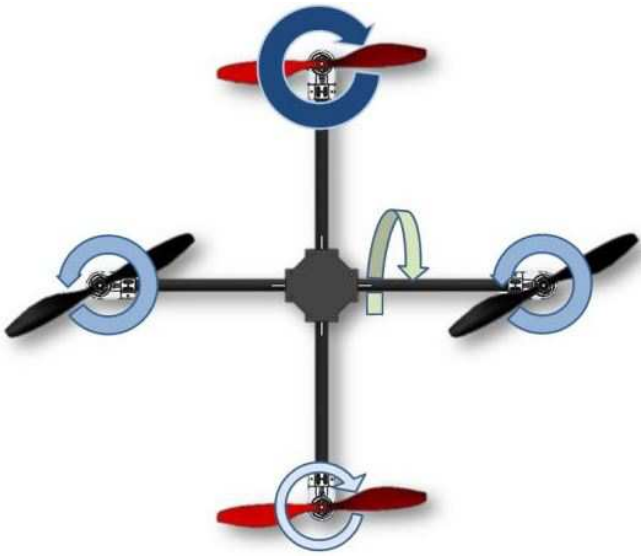


Figura 3. Movimiento de rotación (Roll) (Jaramillo y Gómez, 2013).

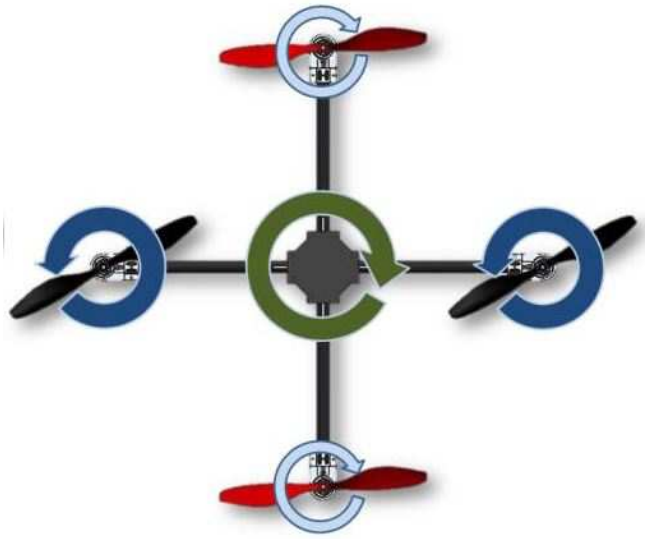


Figura 4. Movimiento de rotacion (Yaw) (Jaramillo y Gómez, 2013).

Sistemas de referencia

Antes de modelar nuestro quadrotor a través de las ecuaciones de la cinemática y la dinámica, necesitamos definir varios sistemas de ejes. La configuración más extendida en este momento está representada en la figura 5, donde podemos observar dos sistemas de referencia.

El primero de ellos, $E(x, y, z)$, se denomina sistema inercial y es un sistema fijo en el espacio. Es el sistema

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

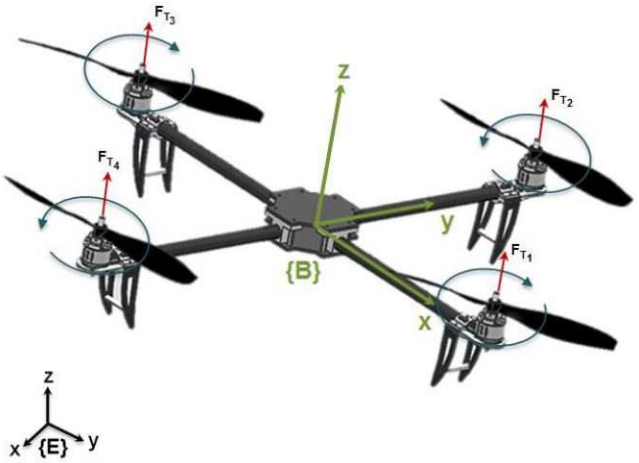


Figura 5. Ejes de coordenadas y fuerzas aplicadas al quadrotor (Jaramillo y Gómez, 2013).

donde se aplican las ecuaciones dinámicas de translación. El segundo, $B(x_L, y_L, z_L)$, es el marco del cuerpo y a él se refieren los giros del quadrotor.

Ángulos de Tait-Bryan

Para describir la orientación del quadrotor en el espacio respecto al marco de referencia fijo se recurre a los ángulos de Tait-Bryan que son alabeo, cabeceo y guiñada, aunque son más conocidos por sus nombres en inglés (roll, pitch y yaw respectivamente) los cuales se utilizan de ahora en adelante. Los tres ángulos de Tait-Bryan se definen de la siguiente manera:

- Alabeo (roll), $R(x, \phi)$, la rotación respecto al eje x.
- Cabeceo (pitch), $R(y, \theta)$, la rotación respecto al eje y.
- Guiñada (yaw), $R(z, \psi)$, la rotación respecto al eje z.

Teniendo claro nuestros dos sistemas de referencias para el modelamiento del quadrotor, uno el sistema inercial $E(x, y, z)$, y el otro el marco del cuerpo $B(x_L, y_L, z_L)$, defínase el vector de la posición del centro de masa del quadrotor relativo al marco de referencia inercial como $p = [px\ py\ pz]^T$ y el vector de la velocidad traslacional $v = [vx\ vy\ vz]^T$, tal que $v = dp/dt$.

Se define el vector de ángulos de orientación: roll, pitch y yaw $\theta = [\theta x\ \theta y\ \theta z]^T$, con respecto al marco inercial. El vector de la velocidad angular en el marco inercial se define como $\Omega = [\Omega x\ \Omega y\ \Omega z]^T$, mientras que $\omega = [\omega x\ \omega y\ \omega z]^T$, representa el vector de la velocidad angular en el marco del cuerpo. La relación entre ambos vectores está dada por

$$\omega = W(\theta)\Omega$$

Donde la matriz de transformación $W(\theta)$ se expresa como

$$W(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_{\theta_y} \\ 0 & c_{\theta_x} & c_{\theta_y} s_{\theta_x} \\ 0 & -s_{\theta_x} & c_{\theta_x} c_{\theta_y} \end{bmatrix}$$

Se define la matriz de rotación ortogonal $R(\theta)$ que representa la orientación del Quadrotor

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c_{\theta_y} c_{\theta_z} & s_{\theta_y} c_{\theta_z} s_{\theta_x} - s_{\theta_z} c_{\theta_x} & s_{\theta_y} c_{\theta_z} s_{\theta_x} + s_{\theta_z} s_{\theta_x} \\ c_{\theta_x} s_{\theta_z} & s_{\theta_y} s_{\theta_z} s_{\theta_x} - s_{\theta_z} c_{\theta_x} & s_{\theta_y} s_{\theta_z} c_{\theta_x} - c_{\theta_z} s_{\theta_x} \\ -s_{\theta_y} & c_{\theta_y} s_{\theta_x} & c_{\theta_y} c_{\theta_x} \end{bmatrix}$$

Las fuerzas de sustentación f_i producidas por las hélices de los rotores pueden ser compactadas en el vector de fuerza F (en el marco del cuerpo)

$$R = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

Donde dichas fuerzas de sustentación dependen de forma directa de la potencia cuadrada de velocidad de rotación de las hélices del motor, tal que

$$f_i = k w_{mi}^2,\ i = 1, .., 4$$

Donde k es una constante positiva dimensionalmente apropiada y w_{mi} es la velocidad angular de $i - esimo$ rotor $m_i, i = 1, .., 4$. Sumando las fuerzas producidas por las hélices de los rotores, se obtiene la fuerza total de empuje T_B del quadrotor (en el marco del cuerpo), la cual se expresa como

$$T_B = \sum_{i=1}^{4} fi = k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^{4} \omega_{mi} \end{bmatrix}$$

Del tal forma que el vector de fuerza generalizada en el marco inercial $F = [Fx\ Fy\ Fz]^T$, se obtiene a partir de

$$F = R(\theta) T_B$$

Sumándose al vector fuerza F_I tenemos también la fuerza de fricción debida a la resistencia del aire que choca con el cuerpo del Quadrotor, la cual es proporcional a la velocidad traslacional en cada dirección (Ollervides et al., s.f.). Para este modelo de fricción, se utilizará el concepto simplificado de la fricción viscosa, de tal forma que el vector de la fuerza de fricción traslacional F_D (en el marco inercial) se define como

$$F_D = \begin{bmatrix} F_{D_x \dot{p}_x} \\ F_{D_y \dot{p}_y} \\ F_{D_z \dot{p}_z} \end{bmatrix}$$

A continuación se define el vector de los torques que actúan sobre cada uno de los ejes de rotación del Quadrotor

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}$$

Donde τ_x es el torque de alabeo aplicado alrededor del eje B_x, τ_y es el torque de cabeceo aplicado alrededor del eje B_y , y τ_z es el torque de guiñada aplicado alrededor del eje B_z. Si se asigna de manera arbitraria los rotores m1 y m3 paralelos al eje B_y , tal que

$$\tau_x = f_1 - f_3 = \ell(k\omega_{m1}^2 - k\omega_{m3}^2)$$

Donde τ es la distancia del centro de masa del Quadrotor con respecto a los ejes de cada uno de los rotores. De forma correspondiente se asignan los rotores m2 y m4 paralelos al eje B_x, tal que

$$\tau_y = f_2 - f_4 = \ell(k\omega_{m2}^2 - k\omega_{m4}^2)$$

Para calcular el torque de guiñada alrededor del eje B_z, es necesario considerar los torques de arrastre que se producen en los cuatro rotores montados en el extremo de cada brazo del Quadrotor. El torque de arrastre (drag) de cada rotor depende de la componente de fuerza aerodinámica paralela a la dirección del movimiento relativo entre el objeto y la corriente de aire (Ollervides et al., s.f.). Esta fuerza se opone al avance del cuerpo. Los torques reactivos de cada uno de los rotores son producidos por las fuerzas de arrastre, mientras que los motores brushless montados en cada rotor, se encargan de producir el torque eléctrico aplicado a cada una de las hélices. Es importante notar que la velocidad angular ω_{mi}, de la $i-esima$, hélice, depende de forma directa del torque eléctrico generado por el $i-esimo$ motor, mientras que el $i-esimo$ torque reactivo de arrastre, es producido por la resistencia del aire al impactar con la sección lateral de la hélice, el cual depende de forma cuadrática de la velocidad angular de la $i-esima$ hélice (Ollervides et al., s.f.). Este torque reactivo de arrastre puede ser expresado como

$$\tau_{d_i} = b\omega_{m_i}^2, i = 1, .., 4$$

Si los servoamplicadores de cada motor son configurados para generar el torque eléctrico de dos rotores en sentido horario, y los otros dos en sentido anti horario, entonces de esta forma se evitan los efectos giroscópicos del torque de guiñada τ_z alrededor del eje z. Para tal caso se define el torque de guiñada por la siguiente ecuación

$$\tau_z = b(\omega_{m_1}^2 - \omega_{m_2}^2 + \omega_{m_3}^2 - \omega_{m_4}^2)$$

De tal forma que el vector de los torques aplicados al Quadrotor en el marco del cuerpo se describe como

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell k(\omega_{m_1}^2 - \omega_{m_3}^2) \\ \ell k(\omega_{m_2}^2 - \omega_{m_4}^2) \\ b(\omega_{m_1}^2 - \omega_{m_2}^2 + \omega_{m_3}^2 - \omega_{m_4}^2) \end{bmatrix}$$

En el marco inercial, la aceleración del Quadrotor es debida a: la fuerza total de empuje producida por las hélices de cada rotor, la fuerza de gravedad de la tierra, y la fricción traslacional. Es posible calcular el vector de empuje en el marco inercial utilizando la matriz de rotación $R(\theta)$ para mapear el vector de empuje T_B del marco del cuerpo al marco inercial. Entonces el movimiento traslacional del Quadrotor puede ser expresado por la siguiente ecuación

$$m\ddot{p}_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R(\omega)T_B + F_D$$

Donde la constante g representa la aceleración de la gravedad, y la constante m representa la masa del Quadrotor. Es conveniente tener las ecuaciones de movimiento traslacional expresadas con respecto al marco inercial. Para poder expresar los movimientos de rotación del Quadrotor alrededor de su centro de gravedad, en lugar de su centro inercial, entonces las ecuaciones de movimiento rotacional se definen con respecto al marco de referencia del cuerpo. Para obtener las ecuaciones de movimiento rotacional, se utilizan las ecuaciones de Euler definidas para la dinámica de un cuerpo rígido. Expresando las ecuaciones de Euler en forma vectorial, se escriben como

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = \tau$$

Donde I es la matriz de inercia, y τ es el vector de los torques externos, mencionado anteriormente. Reescribiendo la ecuación anterior, tenemos

$$\dot{\omega} = \frac{\mathrm{d}\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}}{\mathrm{d}x} = I^{-1}(-\omega \times I\omega + \tau)$$

Donde el operador $\times$ denota el producto cruz. Considerando que la estructura mecánica del Quadrotor está conformada por dos barras que se cruzan en el origen con un punto de masa definido en el extremo de cada barra (masa de motor montado en el rotor), es claro que debido a esta simetría geométrica, la matriz de inercia puede ser considerada como diagonal, tal como se expresa a continuación

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Entonces se obtiene el vector de las ecuaciones de movimiento rotacional respecto al marco del cuerpo:

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} (\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}})\omega_y\omega_z \\ (\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}})\omega_x\omega_z \\ (\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}})\omega_x\omega_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\frac{1}{I_{xx}})\tau_x \\ (\frac{1}{I_{yy}})\tau_y \\ (\frac{1}{I_{zz}})\tau_z \end{bmatrix}$$

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

El propósito de obtener el modelo matemático del Quadrotor, nos permite tener un mejor soporte con respecto a la estabilidad y el desempeño del Quadrotor, y en lo particular para el diseño de controladores que utilicen la realimentación de las variables de estado físicas de Quadrotor. Considerando el siguiente vector de estados para la ecuación de estados vectorial del Quadrotor

$$x = [p_x\ p_y\ p_z\ v_x\ v_y\ v_z\ \theta_x\ \theta_y\ \theta_z\ \omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T$$

Se obtiene la siguiente ecuación de estado para el quadrotor

$$\dot{x} = \frac{\mathrm{d}\begin{bmatrix} p \\ v \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix}}{\mathrm{d}x} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \frac{R(\theta)}{m} T_B + \frac{1}{m} F_D \\ W(\theta)_\omega \\ I^{-1}(-\omega \times I\omega - \tau) \end{bmatrix}$$

Control PID

El control para un quadrotor no es para nada trivial debido a la interacción que tiene con el mundo externo, el propósito del control será dar órdenes de entrada para poder controlar los ángulos del Quadrotor (pitch, roll, yaw), es decir, Los comandos que se envían a los motores se basan en el error entre el ángulo que queremos y el ángulo que tiene, según lo medido por la IMU (Barreno, 2015).

Los tres componentes del control PID son:

- Proporcional (P) : El comando es proporcional a la cantidad de error angular que tenemos. Ayuda a devolver el Quadcopter al ángulo deseado (Barreno, 2015).
- Integral (I) : El comando es proporcional al error acumulado con el tiempo. Puede ayudar a combatir trastornos tales como el viento o el rendimiento del motor asimétrica (Barreno, 2015).
- Derivada (D) : El comando es proporcional a la tasa de cambio del error. Se resiste el movimiento y mantiene el ángulo de rebasamiento del objetivo (Barreno, 2015).

Las constantes Kp y Ki se calcularon experimentalmente, es decir con varios vuelos de prueba que nos ayudaron a encontrar las mejores valores para las constantes también teniendo en cuenta que:

- El aumento de Kp empuja la Quadcopter hacia el ángulo deseado más rápido, pero también puede tener más sobreimpulso y oscilación.
- El aumento Ki es proporcional a la magnitud del error y la duración del error. Si el término integral es demasiado alta, la multicopter comenzará a oscilar.

El Quadrotor se vuelve inestable para ciertos valores de la ganacias. Cuando tenemos valores de Kp, Ki que son demasiado altos el prototipo se vuelve muy ruidoso y tiende a generar oscilaciones y la inestabilidad (Barreno, 2015).

Metodología

El primer paso para construir un quadrotor es decidir el tamaño y los elementos que tendrá el prototipo (dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar), para nuestro caso tendrá aplicaciones totalmente académicas como desarrollo de control más robustos y nuevas estrategias de vuelo. Después de definir el tamaño y los elementos pasaremos a implementarlos en el chasis o frame del prototipo de una forma que quede con un peso balanceado para no afectar su vuelo.

Las conexiones de los motores a los ESC'S y de los ESC'S al conector de la batería se omitieron y se soldaron, con el propósito que el prototipo no tenga pérdidas en esos puntos. Antes de proceder a conectar los ESC'S a la tarjeta de control es definir la dirección de los motores (giro) y darles un número a cada uno en un orden siguiendo las manecillas del reloj para poder reconocer en la pantalla LCD de la tarjeta.

Instalación y programación tarjeta control de vuelo

- Para realizar la primera instalación es mejor retirar las hélices de los motores para prevenir un accidente, ya que uno de los motores se puede energizar al hacer una mala programación en la tarjeta de control (Hobbyking, s.f.).
- Se instala la tarjeta de control sobre el chasis separado por una espuma que hace disminuir las vibraciones producidos por los motores hacia la tarjeta.
- Conectar los pines en la parte izquierda de la tarjeta de vuelo al receptor teniendo en cuenta el pin de la señal, la alimentación de 5V y la masa o tierra, de arriba hacia abajo el orden es:
- Roll
- Pitch
- Throttle
- Yaw
- Aux
- Para los canales desde el Pitch hasta el Aux solo fue suficiente utilizar el pin de la señal, ya que el canal del Roll proporciona la alimentación al receptor, los demás son comunes.
- El canal AUX puede ser controlado por un interruptor de la emisora, y de esta manera cambiar a modo de estabilización en pleno vuelo. Este modo permite a la tarjeta mantener el prototipo estable oponiéndose a las órdenes que se den en los ejes del Roll y pitch, pero deja el YAW y el THROTTLE libres.
- Conectar los ESC'S en los pines de la parte derecha de la tarjeta, estos pines están ordenados de motor 1 a motor 8, el cable blanco corresponde a la señal, el rojo a la alimentación de 5V y el negro la masa o tierra.
- La tarjeta de control tiene dos pines en la parte superior izquierda el cual se conecta un buzzer, con el fin de

programar en la tarjeta de control una alarma para cuando la bateria ya este descargada.

- Calibrar los sensores que incorporan la tarjeta por medio de la opción *MENU - ACC CALIBRATION*, esta calibración debe realizarse estrictamente en un lugar plano y la pantalla mostrará unos valores cercanos entre ellos, lo que da a entender que esta bien calibrado.
- Una vez calibrado los sensores se procede a configurar el quadcopter en modo equis (x) el cual fue indicado en la tarjeta de control, esta configuración es muy importante al igual que la correcta instalación de la tarjeta de control en el chasis del prototipo para tener bien en claro los ejes positivos y negativos del Roll y Pitch.

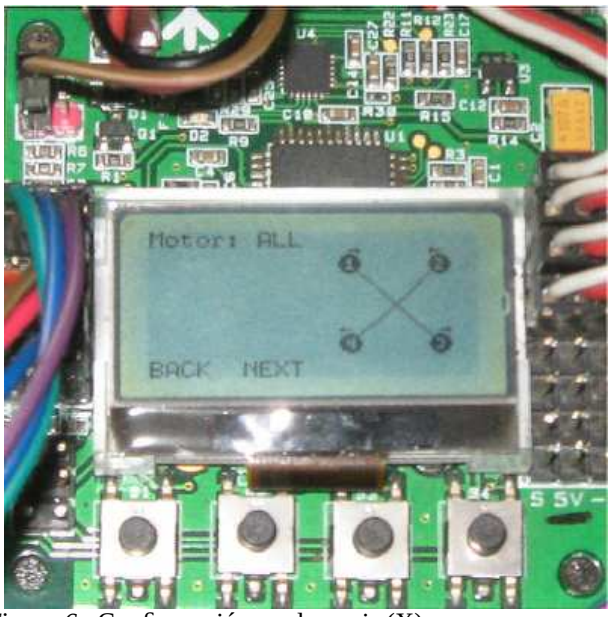


Figura 6. Configuración modo equis (X).

La emisora TURNIGY 9X al no disponer de un manual de usuario se empezó a probar con sus valores por defecto de fábrica, se evidenció que no hubo ningún resultado en el prototipo, con base en estos resultados se opto por buscar vía internet un manual de usuarios para la emisora.

- En la emisora en la opción *MENU/SYSTEM SETTING/TYPE SELE* se crea un modelo de tipo avión ACRO (multicopteros)
- En la opción MODEVAT se selecciona *PPM* (modulación por pósición de pulso).
- En la opción STICK SET se escoje *MODE 2* para tener compatibilidad con los canales de la tarjeta de vuelo.
- Luego de haber configurado SYSTEM SETTING, se configura FUNC SETTING, se hizo una configuración básica, como por ejemplo que los canales no estén invertidos, es decir al mover las palancas se confirmaba en la tarjeta KK2.1.5 (controlador de vuelo) en la opción *Receiver test*

Figura 7. Emisora Turnigy 9X.

que correspondieran a la dirección en que se ejercía en la palancas (Throttle, Roll, Yaw, Pitch).

- Como medida de seguridad tanto para el prototipo como para el usuario la emisora cuenta con una función *THR HOLD* el cual permite apagar instantáneamente el prototipo por medio de la palanca *Corte acelerador*, teniendo en cuenta en no accionar esta palanca en grandes alturas ya que se apagaría y los daños serian muy grandes.
- En la pantalla de la tarjeta kk2.1.X en la opción *receiver test* se ven unos números bien sean negativos o positivos, lo ideal para un buen vuelo es dejar esos valores en cero (0) y se puede modificar mediante los *TRIMS* de la emisora, ya que si no son modificados el prototipo tiende a moverse de una manera incontrolada en cada uno de sus ejes.
- Al llevar a cabo los anteriores pasos, se procede a realizar el primer vuelo, pero antes se deben balancear las hélices, esta operación se realizó en una base plana tal que cuando se fijen en su eje deben permanecer completamente horizontales, de lo contrario se usa un trozo de cinta aislante para dar peso en la pala y así conseguir su balance.

Para la opción *PI EDITOR* se dejarán los valores establecidos de fábrica, de igual forma en la evaluación de desempeño se explicará que cambios fueron necesarios en cada eje (Roll, Pitch, Yaw). Aún así se explicarán las demás funciones del MENU de la tarjeta de vuelo.

Motores *Brushless*

La parte más importante del prototipo son los rotores, ya que estos son los encargados de dar la propulsión al quadrotor, encontramos adecuado usar motores trifásicos sin escobillas (*brushless*) ya que presentan mejores características que lo motores con escobillas. Los motores brushless tienen muchas ventajas, la principal es que no hay partes con fricción, excepto los rodamientos, por lo que

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

su desgaste es mínimo y muy adecuado para una aeronave que va tener un uso muy extenso, el aprovechamiento de la potencia, rendimiento,temperatura, además los motores sin escobillas son más livianos en comparación con un motor con escobillas de la misma potencia, estas escobillas son reemplazadas por un dispositivo electrónico que mejora la durabilidad del motor.

Figura 8. Motor D2822/14 Brushless Outrunner 1450 kV.

Una de las desventajas de los motores DC sin escobillas, es que requieren de un sistema electrónico por aparte para poder operar, normalmente denominado como *controlador electrónico de velocidad* (ESC por sus siglas en inglés), utiliza una entrada de sensores que indican la posición del rotor, para energizar las bobinas del estator en el momento correcto.

Antes de comprar un motor brushless debemos conocer dos características importantes estas son :

Revoluciones por voltio (Kv) este dato es importante porque dependiendo del voltaje de la batería que vayamos a emplear, el motor alcanzará unas revoluciones u otras.

Voltaje y amperaje máximo admitido, cada motor, dependiendo del tamaño y bobinado que tenga, podrá soportar una cantidad máxima de voltaje (V) e intensidad (A).

Sabiendo lo anterior decidimos escoger un motor D2822/14 Brushless Outrunner 1450kV, que tiene las siguientes características:

- kV (rpm/v): 1450
- Peso (g): 38
- Voltaje Max (V): 11
- Potencia (W): 160

Controladores electrónicos de Velocidad (ESC'S)

Los Controladores Electrónicos de Velocidad (ESC'S por sus siglas en inglés) son los dispositivos encargados de coordinar y dar paso a la rotación y control de los motores sin escobillas. Estas unidades se encargan de generar la secuencia de pulsos trifásicos que son requeridos para provocar el movimiento de los motores sin escobillas.

Figura 9. Controlador electrónico de velocidad.

Los ESC'S se dimensionan por la intensidad de corriente que son capaces de proveer al motor. En particular, para los motores utilizados en este trabajo, el fabricante recomienda utilizar controladores de 20A. Los ESC utilizados son los HobbyKing 20A ESC 3A UBEC, con las siguientes especificaciones:

- Corriente constante: 20A
- Corriente de estallido: 25A
- Batería : 2-4S Lipoly / 5-12s NiXX
- BEC: 5v / 3A
- Tipo de motor: Brushless
- Tamaño: 54 x 26 x 11 mm
- Peso: 30g

Hélices

La hélice es un dispositivo constituido por un número variable de aspas o palas (2, 3, 4...) que al girar alrededor de un eje producen una fuerza propulsora, el numero de aspas que escogimos para nuestro modelo fue de 2 aspas, la diferencia de rendimiento en una hélice de 2 palas comparado con una de una hélice 3 palas es muy poco. Una hélice de 3 ó 4 palas le dará más empuje.

Las hélices de 2 palas son más eficientes pero también más ruidosas y producen más vibraciones que las de tres en el interior de la nave, en un quadrotor las vibraciones son importantes para la tarjeta de control de vuelo. Una hélice de 2 palas produce dos pulsos de presión por revolución, donde una hélice de 3 palas producirá tres pulsos más pequeños por revolución (para la misma cantidad de empuje total) que es inherentemente más suave y por lo tanto más tranquilo y menos ruidosa.

Las hélices para el prototipo no son las mismas para los cuatro motores, solo para los motores del mismo giro corresponde la misma hélice, es decir dos y dos, ya que al colocar una hélice de diferente dirección no empleará el vuelo y se mantendrá estacionario el prototipo. Para saber que hélice colocar en cada motor se mira dependiendo del giro que la hélice corte el viento para abajo.

Como se menciona anteriormente se escogió hélices de 2 aspas de 8 x 4.5 con las siguiente características:

Figura 10. Hélices Multirotor 8X4.5, 4 Hélices 2CW Y 2CCW.

- Longitud: 8 pulgadas
- Paso: 4.5

Baterías

Existen en el mercado varias baterías recargables y las que no es posible darles uso de nuevo, para nuestro prototipo es mucho mejor tener baterías recargables, una de las baterías más utilizadas en los sistemas aéreos o móviles, son las baterías Li-Po, estas baterías tienen un tamaño reducido con respecto a otras.

Las baterías de Polímero de Ión de Litio, también conocidas como baterías de Polímero de Litio o LiPo por su abreviatura en inglés, son un tipo de baterías recargables de alto rendimiento, las cuales normalmente se encuentran compuestas de una o varias celdas que se disponen tanto en serie (para aumentar la tensión de salida de la batería) como en paralelo (para aumentar la capacidad y la corriente de descarga de la batería). Se caracterizan porque permiten niveles altos de descargas de corriente eléctrica, motivo por el cual, estas serán las baterías seleccionadas para el desarrollo del presente proyecto.

Para proporcionar una rápida aceleración y duraciones considerables, las baterías de cualquier sistema autónomo tiene que proporcionar una gran potencia y energía. Además, han de ser de bajo precio, fáciles de mantener, seguras bajo condiciones de funcionamiento externo y tolerantes a las consecuencias en donde los vehículos aéreos están expuestos (aire libre, caídas, etc.).

Como todas las demás partes, la batería también tiene características que debemos tener en cuenta para escoger la apropiada para nuestro modelo, lo primero es la duración o capacidad este parámetro viene dado en mAh, también es importante saber el número de celdas (2,3,etc.) y conexión de las celdas (S para serie y P para paralelo) y la última que es el voltaje o tensión en voltios(V).

Figura 11. Bateria LiPo.

La batería escogida y sus características son las siguientes: KINGMAX 2200mAh 2S 35C Lipo

- Capacidad: 2200mAh
- Configuración: 2S / 7.4 v / 2 Cell
- Constante de descarga : 35C
- Peso : 120g
- Dimensiones : 110 x 15 x 15mm

Controlador de vuelo

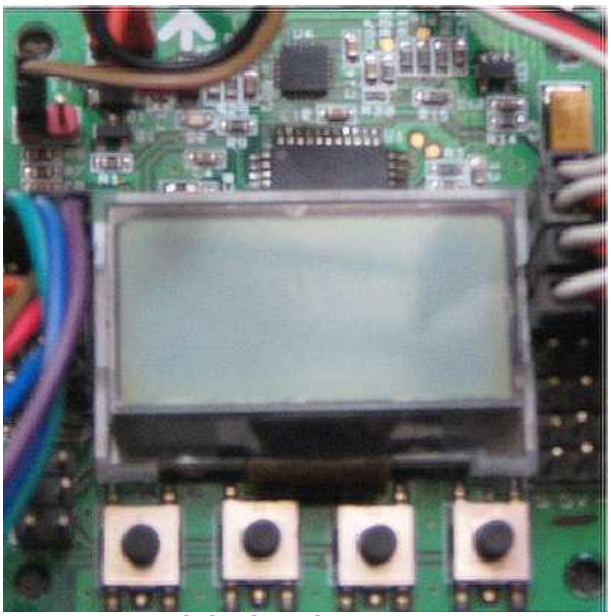


Figura 12. Controlador de vuelo.

Se instaló en la aeronave una placa Hobbyking KK2.1.X versión 1.19S1 Pro Stevies Multi-rotor LCD Flight Control Board With 6050MPU And Atmel 644PA. Funciona bajo una tensión de 5V alimentada por los tres cables del ESC del motor uno, gracias al BEC que incorporan cada variador de velocidad los cuales son el blanco que proporciona la señal,

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

el rojo alimentación de 5 voltios y el negro la tierra o el negativo.

La misma cuenta con los sensores necesarios para la estimación de la orientación del quadrotor y un procesador para computar las acciones de control. Los sensores disponibles en la placa son: 3 acelerómetros, 3 giróscopos, 3 magnetómetros y un barómetro. El procesador instalado en la placa es un Atmega644 PA. La placa cuenta con una conexión de puerto serie UART disponible para la telemetría y la comunicación, además de salidas PWM para el control de los ESC.

Sistema de comunicación

Las redes inalámbricas (Wireless network en inglés) se diferencian de las convencionales principalmente en la capa física (conexión de nodos sin necesidad de una conexión física mediante cable) y en la capa de enlaces de datos (La transmisión y la recepción se realizan a través de puertos) , según el modelo de OSI.
La capa Física (PHY) indica cómo son enviados los bits de una estación a otra. La capa de Enlace de Datos (MAC Medium Access Chanel) se encarga de describir cómo se empaquetan y verifican los bits de manera que no tengan errores. Los dos métodos que se emplean para reemplazar la capa física en una red inalámbrica son la transmisión de Radio Frecuencia y la Luz Infrarroja.

La comunicación inalámbrica por medio de sistemas de banda estrecha (narrow band) o de frecuencia dedicada, trabajan de una forma similar a las ondas de una estación de radio. Esta señal puede atravesar paredes por lo que puede alcanzar una red bastante amplia, sin embargo tienen problemas con las reflexiones que sufren las ondas de radio, para establecer esto hay que evitar las posibles interferencias.

Componente RF. Los sistemas RF complementan a las redes por cable, extendiéndolas.

- Las antenas son el componente mas crítico de cualquier sistema RF porque convierten las señales eléctricas en ondas de radio y viceversa.
- Los amplificadores hacen la señal mucho mas grande. La señal aumentada o ganancia se mide en decibeles (dB). Los amplificadores pueden ser clasificados en tres categorías: bajo ruido, alto poder, y otros.

Tanto el emisor como el receptor se deben sincronizar de esta forma, el receptor esta siempre escuchando en la frecuencia del transmisor.

Tecnología ZIG-BEE. Es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envió de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Como características principales se pueden detallar:

- Bajo consumo
- Tipología de red en malla.
- Fácil integración en placas electrónicas.

Nacido para convertirse en un sistema estándar de comunicaciones inalámbrico y bidireccional, pensado especialmente para aplicaciones en el campo de la domótica, control industrial, periféricos de PC y otros sensores. Este sistema puede transmitir con un simple protocolo de 20 kbps hasta 250 kbps, a una frecuencia de 2,4 GHz con una tecnología GSSS, bajo consumo y un rango de 10 a 75 metros (aunque actualmente han salido dispositivos de mayor alcance), influyendo notablemente las circunstancias ambientales de trabajo.

Una vez que el transmisor y receptor están funcionando, el siguiente paso es comunicarle a la tarjeta controladora de vuelo la señal que está saliendo del receptor e interpretarla para obtener información significativa de lo que está comandando el piloto. Para lograr esto primero hay que entender qué señal está saliendo del receptor. La señal que sale de la mayoría de los receptores se usa de manera estándar en servos de radio control, y es una clase de señal PWM.

El cuadricóptero tiene que seguir instrucciones, ya sea de un algoritmo pre-programado o de un operario humano a través de control remoto. Para esto es necesario un sistema que transmita las instrucciones y otro que las reciba y se las comunique al controlador de vuelo. La forma más factible por el rango que se debe manejar es la comunicación por radiofrecuencias.

Características sistema de comunicación inalámbrica bidireccional. Para poder tener control constante del quadrotor debe haber una comunicación constante entre este y el terminal, en este caso un control remoto (Turnigy 9X), desde el cual el operador humano, recibirá la información del móvil y le enviara instrucciones. La comunicación entre el móvil y el control remoto debe ser una comunicación inalámbrica bidireccional.
La principal características de este sistema de comunicación es que tanto el quadrotor y el control remoto son capaces de trasmitir y recibir datos por el mismo canal.

Parte 1: hardware y construcción física

Se requiere un sistema de transmisor y receptor capaz de comunicarse a una distancia aproximada de 100m y que tenga un precio accesible. Se encontró un sistema de transmisor y receptor que dan un buen funcionamiento por su precio: el transmisor Turnigy 9X 9Ch Transmitter w/ Module y 8ch Receiver (Mode 2) (v2 Firmware). Este sistema tiene un rango de entre 100m y 1000m dependiendo de las

condiciones. Además, el receptor es muy ligero pesando sólo 18 g.

Figura 13. Turnigy 9X 9Ch Transmitter w/ Module y 8ch Receiver.

Marco o estructura de soporte

Una de las partes más importantes para el vuelo estable de un quadrotor es el marco, que debe ser ligero y rígido para que tenga características de vuelo óptimas, pero al mismo tiempo resistente para que no se rompa en aterrizajes duros o en caso de colisiones.

Para el desarrollo del marco de nuestro quadrotor elegimos como programa de diseño Sketch Up Pro 2015, es un programa que permite diseños en 3D y es de fácil manejo, por medio de este programa realizamos el diseño de cada parte del marco del modelo. Para el cual se diseño cuatro brazos de un medida de 18.3 cm de largo, 3.11 cm de ancho y 0.3 cm de espesor, la parte central tiene unas medidas de 10 cm x 10 cm, y se le adapto un tren de aterrizaje similar al de los helicópteros. Todas las partes van a ser aseguradas con tornillos y tuercas de un diámetro de 5 mm.

Los brazos tienen un diseño especial en los extremos para asegurar los motores de manera precisa, evitando complicaciones a la hora de instalarlos y sin peligro a que se vayan a desajustar en las pruebas de vuelo.

El material elegido para el quadrotor fue acrílico, es un material que se acerca a lo que queríamos, además es un material que proporcionó la universidad y el diseño fue cortado en la universidad.

Evaluación de desempeño

Las pruebas iniciales se realizaron con el menor peso posible para el quadcopter (estructura del chasis sencilla, figura 15), con el fin de poder evidenciar que altura toma y que rendimiento alcanza a tener en un determinado tiempo.

En el primer vuelo los valores de PI EDITOR se dejaron por defecto de fábrica, con los cuales realizó un vuelo estable pero con una dirección en diagonal *Pitch Positivo*. Se evidencio que en el primer vuelo cuando los motores alcanzan su máxima potencia, los brazos tienden a doblarse hacia arriba, bien sea por el largo o por lo delgado que pueden llegar a ser los brazos, al evidenciar esto no fue posible dejar el prototipo así, ya que no es posible realizar una correcta sintonización en la tarjeta de control, en la Figura 16 se muestra en el software como es el chasis o frame.

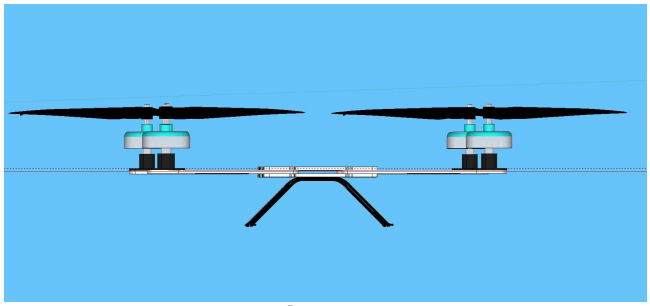


Figura 16. Diseño original.

Como primera solución se optó en buscar un acrílico con un mayor espesor para reducir la flexión, al llegar a obtener los brazos más gruesos se evidenció una mejora en su despegue pero no fue del todo exitosa, es decir aún se doblan los brazos del prototipo. Como solución final se decidió usar brazos dobles, es decir uno encima del otro para cada brazo, separados por tubos de 1 cm de largo y con diámetro de 6 mm, en donde se pudo ajustar con tornillos y tuercas como se observa en la Figura 17 y 18.

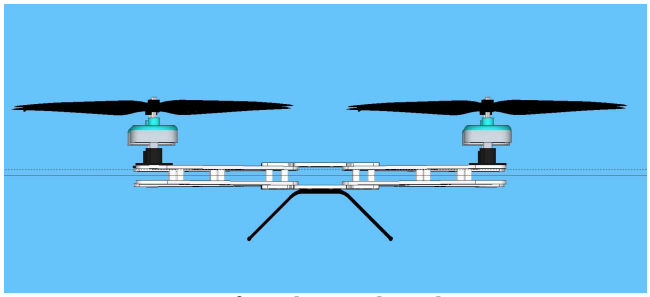


Figura 18. Diseño reforzado vista lateral.

El resultado fue el esperado el prototipo es 100 por ciento rígido, pero con un peso mayor en su chasis cosa que hace menor el rendimiento en su vuelo. Para obtener un prototipo final se modificó cada sub-menú de la tarjeta de control, apoyándonos de un manual de usuarios y de varios vuelos realizados en donde se explicará cada uno con sus respectivos valores finales.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

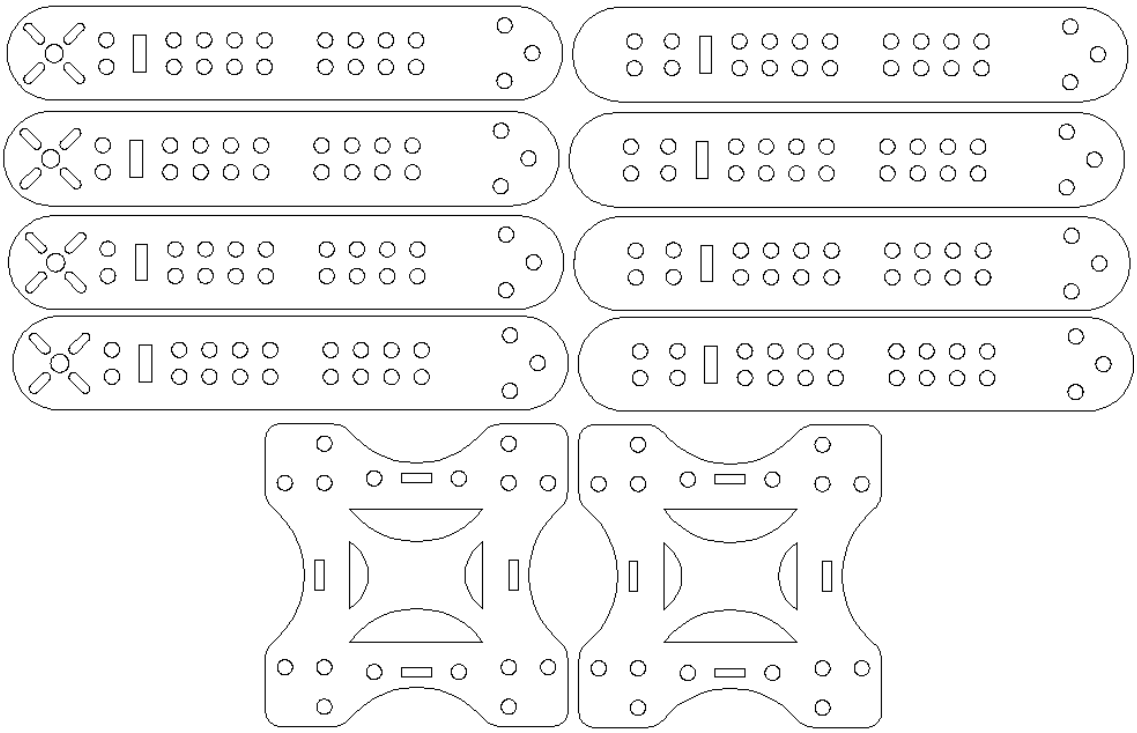


Figura 14. Diseño para corte en acrílico.

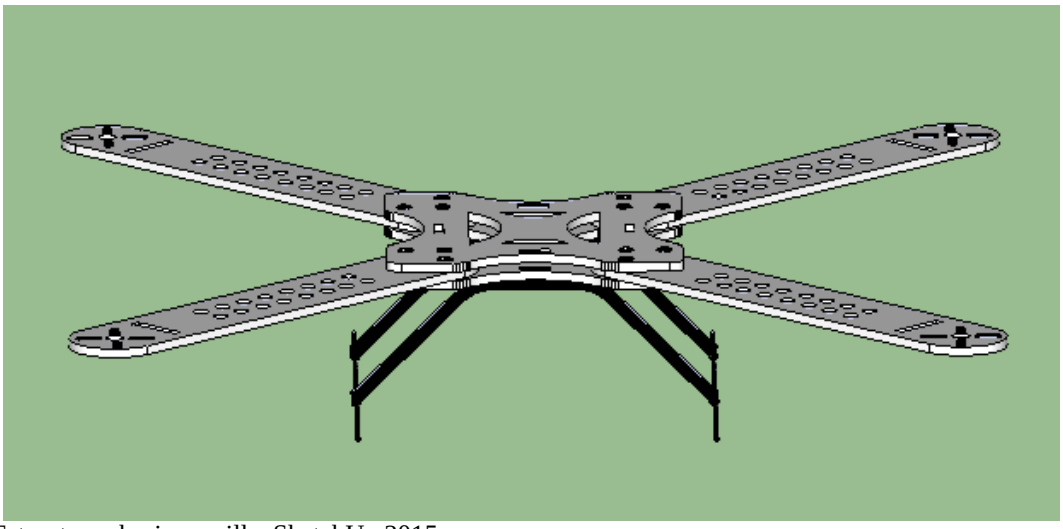


Figura 15. Estructura chasis sencilla, SketchUp 2015.

Sintonización

El proceso de sintonización es un método ensayo-error, este proceso termina cuando se ha obtenido la mayor aproximación en la respuesta del prototipo. La sintonización se ajusta por medio de la tarjeta de vuelo, donde se van cambiando las constantes de cada eje (Roll,Pitch,Yaw).

Para llevar a cabo una sintonización sin tanta dificultad se realizo un primer vuelo con sus valores por defecto, con el fin que poder evidenciar su respuesta inicial y poder mejorarla para obtener una modelo final.

Para el primer vuelo el prototipo fue muy brusco en su despegue y no se mantuvo estable (tiende hacia adelante y hacia los lados), para ello se aumento la constante *P Gain y I Gain* de los ejes Roll y Pitch en un orden de 5 en 5 para

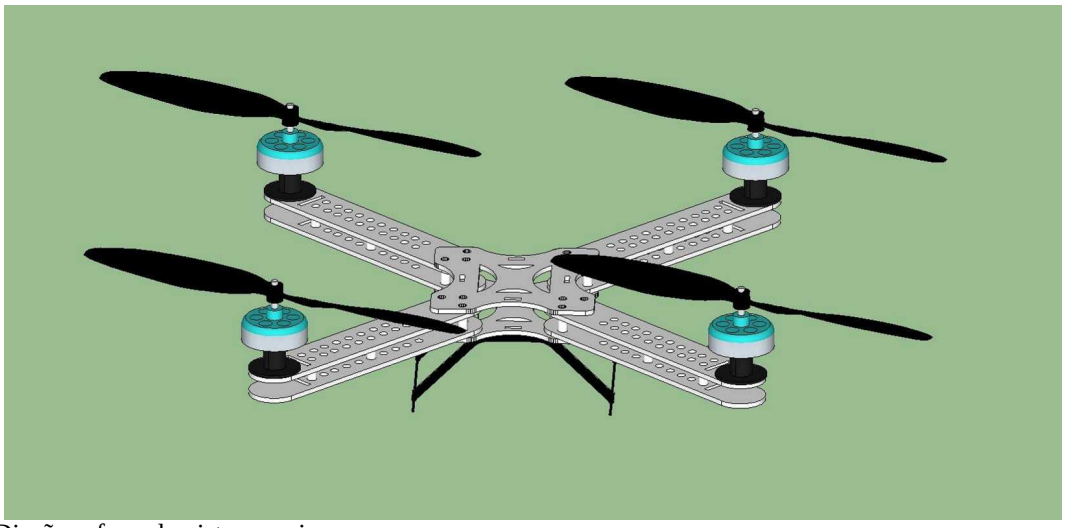


Figura 17. Diseño reforzado vista superior.

El aeromodelo tiende a girarse a un lado	Verifique las conexiones. Si utiliza una mezcla personalizada, verifique todos los valores
El aeromodelo oscila y alcanza una altitud de manera incontrolada después del despegue	Reduzca la ganancia P sobre los ejes Roll y Pitch
El aeromodelo no es estable y cabecea hacia un lado	Aumente la ganancia P sobre los ejes Roll y Pitch
El aeromodelo deriva y no queda estacionario	Es un tanto normal que el aeromodelo derive por la acción del viento. Ajuste mediante los Trims correspondiente para controlar la deriva. Si debe trimar en exceso para mantener un estacionario, verifique los ángulos y la horizontalidad de los brazos así como de los motores
El aeromodelo tiende a ir hacia adelante o retrocede al finalizar la traslación	Aumente la ganancia I sobre los ejes Roll y Pitch

Figura 21. Tabla comportamientos anómalos (Hobbyking, s.f.).

Figura 19. Sintonizacion quadrocopter (Jaramillo y Gómez, 2013).

Figura 20. Eje de ROLL, PITCH y YAW valores por defecto. (Hobbyking, s.f.)

conseguir una mejor respuesta, se decide configurar primero estas ganancias gracias a una tabla disponible del manual de usuarios (Fig. 22).

Después de ver una mejora en el segundo vuelo, se opta por configurar *P GAIN* de los tres ejes nuevamente en un orden de 5 en 5, de tal forma que el prototipo mejore su despegue en diagonal (Fig. 23).

Como tercera prueba el prototipo se comporto adecuadamente en sus ejes de Roll y Pitch pero se evidencio

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

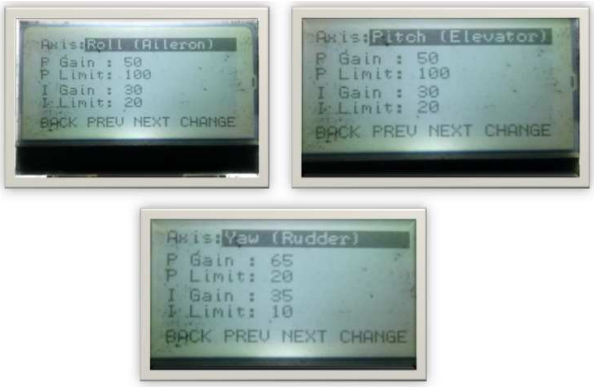


Figura 22. Eje de ROLL, PITCH y YAW segunda prueba (Hobbyking, s.f.).

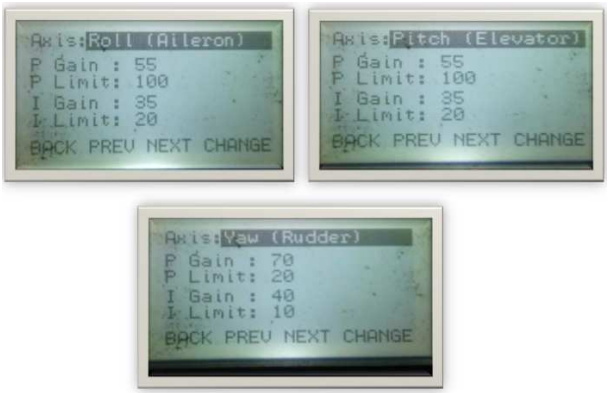


Figura 23. Eje de ROLL, PITCH y YAW tercera prueba (Hobbyking, s.f.).

que giraba entorno a su eje Z (*YAW*) sin ejercer ninguna orden en la emisora , para ello solo se redujo P GAIN del eje YAW, es decir se dejo este eje en sus constantes por defecto de fábrica (Fig. 24).

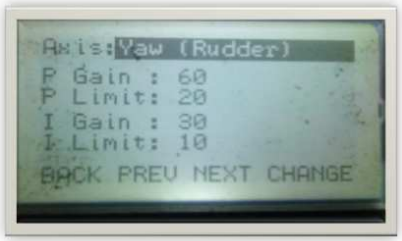


Figura 24. Eje de YAW cuarta prueba (Hobbyking, s.f.).

Al realizar estas cuatro pruebas se obtuvo un prototipo que se ajusta a nuestras necesidades para un vuelo estable y seguro. Las constantes finales de cada eje son (Fig. 25):

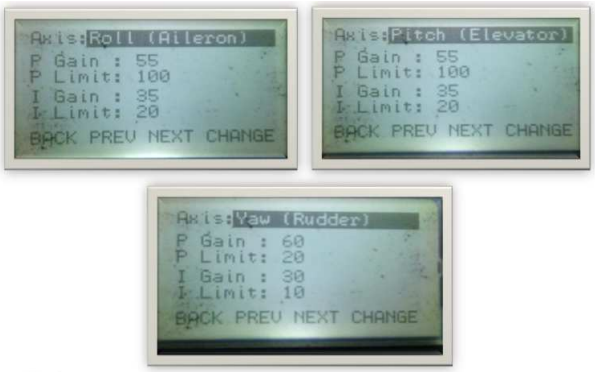


Figura 25. Eje de ROLL, PITCH y YAW ajuste final (Hobbyking, s.f.).

Se puede evidenciar mejor esta metodología de sintonización con un vídeo del aeromodelo en (http://youtu.be/X6xkeaDdqlM).

PI EDITOR

Los valores *PLimit* definen que proporción de la potencia debe ser aplicada a los motores para un ajuste automático. La constante 100 representa el 100 porciento, es decir sin límite *ILimit* es conocido como anti wind-up en los cálculos de PID. La limitación es importante en el YAW ya que sin limite la tarjeta podría obtener una corrección importante y excesiva sobre el YAW hasta el punto de saturar los motores, esto se debe por los captadores (acelerómetros y giroscopios) (Hobbyking, s.f.).

Como por ejemplo, si se establece un 30 porciento (PLimit = 20 + ILimit = 10) de la potencia de los motores que será utilizada para una corrección de YAW. Esto permitiría un 70 porciento de potencia para los ejes de ROLL y PITCH, los más importantes. Si se establece un PLimit elevado del Yaw puede volver al aeromodelo más sensible sobre este eje y su reacción más rápida (Hobbyking, s.f.).

En la Fig. 21 se presenta una tabla la cual ayuda a modificar las constantes de cada eje.

Al realizar varios vuelos (sintonización) se optó por dejar las constantes finales del *PI EDITOR* y son:

ROLL

- P GAIN : 55
- I GAIN : 100
- P LIMIT : 35
- I LIMIT : 20

PITCH

- P GAIN : 55
- I GAIN : 100
- P LIMIT : 35
- I LIMIT : 20

YAW

- P GAIN : 60
- I GAIN : 20
- P LIMIT : 30
- I LIMIT : 10

MODE SETTINGS

- SELF LEVEL : Como activar el modo estabilización, para nuestro prototipo se dejo para el canal auxiliar 5.
- LINK ROLL PITCH : Los valores de las ganacias de los ejes Roll y Pitch toman automáticamente los mismos valores para el modo YES y para el modo NO los valores de las ganacias se pueden modificar independientemente, para el Dron se establecio *YES*.
- AUTO DISARM : Para la opción *YES*, el aeromodelo cuando se activa y no se ejerce ninguna acción en la emisora, se desarmará automaticamente después de 20 segundos y emitirá una alarma constante al desarmarse.
- RECEIVER : Se estableció *std*, de tal manera que concuerde con la configuración de la emisora PPM.
- CHANNEL MAP : Con un recpetor estandar, no se debe asignar ningun canal.
- LOST MODEL ALARM : Cuando la tarjeta se auto desarma, sonará el buzzer en modo "YES"(Steveis, s.f.).

STICK SCALING

Estos ajustes permiten ajustar la sensibilidad de la palanca de mando, un número elevado da una respuesta mas sensible, al evidenciar una buena respuesta en el prototipo se dejaron los valores por defecto (Hobbyking, s.f.).

- Roll : 30
- Pitch : 30
- Yaw : 45
- Throttle : 90

MISC. SETTINGS 1

- Minimun Throttle: Permite ajustar que todos los motores arranquen al mismo tiempo, un valor mayor permitirá una mejor respuesta en el arranque.
- Height Dampening: Se establece en cinco, pues esta opción controla el comportamiento del estabilizador de altitud e intenta compensar los movimientos que aparecen tras una traslación o un golpe de viento, basándose en los valores que proporciona el acelerómetro en el eje Z.
- Height D. Limit: Utiliza un porcentaje de la potencia del motor para aplicar la correción que necesite en su vuelo, para el nuestro se estableció el 30 porciento al ver una respuesta adecuada al variar sus ejes.
- Alarm 1/10 Volts: La tarjeta cuenta con un sistema de alarma el cual ayuda a prevenir la descarga total y es necesario para no disminuir la vida útil de la batería, para este caso se ingreso 69, es decir al detectar la tarjeta los 6.9 voltios el emitirá una alarma haciendo indicar que cada celda esta por debajo de los 3.7 voltios normales de cada celda. Al realizar un pequeño vuelo en un determinado tiempo la tarjeta empezó a pitar de forma continua para dar a entender que la batería se descargó, si se hace caso omiso a esto, el prototipo seguirá volando pero se dañara la batería hasta que se caiga el Dron. Lo más óptimo es aterrizar el quadrotor y realizar la carga de la batería (Steveis, s.f.).
- Acc SW Filter: El valor predeterminado es 8, este valor se puede aumentar para disminuir las vibraciones.

SELF-LEVEL SETTINGS

Configura el comportamiento del estabilizador, se usaron valores muy bajos para empezar y se fue aumentando según el comportamiento del aeromodelo.

- P GAIN: "75", Un número superior provocará oscilaciones y un número inferior reduce el control del stick.
- P LIMIT: "20", limita la potencia con la que la estabilización tomará el mando sobre los motores.

Los demás contenidos del MENU se dejaron por defecto de fábrica y por recomendación del manual de usuarios (Hobbyking, s.f.).

ESC'S CALIBRATION

Esta operación se realizó con la batería conectada y desconectando el conector del ESC de la salida del motor 1.

- Apagar la tarjeta
- Encender la emisora y posicionar la palanca del Throttle al máximo.
- Mantener los pulsadores 1 y 4 de la tarjeta de control de vuelo hasta el último paso.
- Encender la tarjeta
- Esperar hasta que los ESC'S piten para confirmar que la palanca del Throttle se encuentra en su máximo.
- Baje la palanca del Throttle a cero
- Espere hasta que nuevamente los ESC'S emitan un pito para confirmar la correcta calibración (Hobbyking, s.f.).

Normas de seguridad

- Antes de realizar el vuelo, situar el aeromodelo en el suelo en un área amplia y retirarse al menos cinco metros.
- Para armar la tarjeta situar la palanca de THROTTLE a cero y desplazarla a la derecha , la tarjeta emitirá un Bip y ahora estará armada.
- Para acercarse al aeromodelo como medida de seguridad desarme la tarjeta, situé la palanca de THROTTLE a cero y desplazar a la izquierda durante unos segundos y la tarjeta emitirá un Bip y ahora la tarjeta está desarmada (Hobbyking, s.f.).

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Figura 26. Prototipo final.

Conclusiones

El desarrollo de este proyecto de investigación busco diseñar, construir e implementar un quadrotor basándonos en investigaciones actuales, que permita futuras investigaciones específicas en control y planeación de movimiento. Se espera que el prototipo final tenga un impacto directo sobre la comunidad universitaria que genere investigación alrededor de los diferentes sistemas de control y monitoreo de diferentes ambientes. El prototipo final podrá ser utilizado por los estudiantes para tener una mejor comprensión en lo que se refiere a sistemas de control, también va ser de gran importancia para aquellos estudiantes que deseen desarrollar proyectos de investigación con el mismo campo.

La estructura o *frame* es sobre la cual se soportan todas las partes que hacen posible el vuelo del prototipo y es prescindible que sea lo suficientemente rígido, resistente y del menor peso posible teniendo claro lo anterior, decidimos utilizar un material (acríico) proporcionado por la universidad , pero para darle mayor rigidez decidimos colocar en los brazos una estructura doble. Los sensores incluidos en el sistema medición inercial (IMU por sus siglas en inglés) fueron de vital importancia para la estabilización y orientación del prototipo, pero se aprecio en las pruebas de vuelo que las vibraciones de los motores alteran las mediciones que realizan los sensores, por eso se llegó a la solución de implementar una espuma que absorba las vibraciones.

En ambientes interiores donde hay mínima interferencia por los fuertes vientos, los vuelos son menos bruscos y el pilotaje del quadrotor sea más fácil, ahora para ambientes donde el aire se convierte en un factor importante para el desempeño del quadrotor, el prototipo final se comportó de un manera confiable.

Durante los vuelos realizados fue de gran ayuda obtener un prototipo final y a su vez desarrollar la habilidad para pilotear el prototipo, la integración de componentes del quadrotor fueron de gran cuidado, ya que una mala elección provocaría el daño permanente de cualquier pieza. Hemos logrado realizar el objetivo principal del proyecto en diseñar, construir y evaluar un quadrotor de comunicación inalámbrica bidireccional.

Referencias

Achtelik, M., Zhang, T., Kuhnlenz, K., y Buss, M. (2009). Visual tracking and control of a quadcopter using a stereo camera system and inertial sensors. En *Mechatronics and automation, 2009. icma 2009. international conference on* (pp. 2863–2869). Descargado de `http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5246421`

Achtelik, M. C., Stumpf, J., Gurdan, D., y Doth, K.-M. (2011). Design of a flexible high performance quadcopter platform breaking the mav endurance record with laser power beaming. En *Intelligent robots and systems (iros), 2011 ieee/rsj international conference on* (pp. 5166–5172). Descargado de `http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6094731`

Barreno, Y. (2015, MAYO). *Diseño construcción e implementación de banco de pruebas para sistemas de control, implementado pid's.*

Chen, M. Y., Edwards, D. H., Boehmer, E. L., Eller, N. M., Slack, J. T., Speck, C. R., y cols. (2013). Designing a spatially aware and autonomous quadcopter. En *Systems and information engineering design symposium (sieds), 2013 ieee* (pp. 213–218).

Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6549521

Fatan, M., Sefidgari, B. L., y Barenji, A. V. (2013). An adaptive neuro pid for controlling the altitude of quadcopter robot. En *Methods and models in automation and robotics (mmar), 2013 18th international conference on* (pp. 662–665). Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6669989

Gaponov, I., y Razinkova, A. (2012). Quadcopter design and implementation as a multidisciplinary engineering course. En *Teaching, assessment and learning for engineering (tale), 2012 ieee international conference on* (pp. H2B–16). Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6360335

Gupte, S., Mohandas, P. I. T., y Conrad, J. M. (2012). A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. En *Southeastcon, 2012 proceedings of ieee* (pp. 1–6). Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6196930

Hobbyking. (s.f.). Manual kk2.0 multi-rotor lcd flight control board [Manual de software informático].

Jaramillo, F., y Gómez, A. (2013). *Sistema de control para la estabilidad y orientación de un helicóptero quadrotor.*

Morar, I., y Nascu, I. (2012). Model simplification of an unmanned aerial vehicle. En *Automation quality and testing robotics (aqtr), 2012 ieee international conference on* (pp. 591–596). Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6237779

Ollervides, E. J., Dzul, A., Sáenz, A., y Santibánez, V. (s.f.). Diseño de una plataforma para el control embarcado de un quadrotor.

Sa, I., y Corke, P. (2012). System identification, estimation and control for a cost effective open-source quadcopter. En *Robotics and automation (icra), 2012 ieee international conference on* (pp. 2202–2209). Descargado de http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6224896

Steveis. (s.f.). Kk2.1.x instruction manual v1.19s1 pro [Manual de software informático].

CC BY NC ND

Revista Tekhnê
Enero - Junio 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 31– 40
© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Implementación de un algoritmo de morfogénesis para el diseño de disipadores de calor

Implementation of a morphogenesis algorithm for heatsinks design

Juan C. Amado H.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jcamadoh@correo.udistrital.edu.co

Cristhian E. Garay G.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
cegarayg@correo.udistrital.edu.co

Fernando Martínez S.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
fmartinezs@udistrital.edu.co

Este artículo presenta el resultado de un trabajo de investigación que pretende realizar el diseño de un disipador de calor, optimizado para las proporciones del empaquetado para transistores TO-220, por medio de un algoritmo de morfogénesis realizado en Matlab. Este algoritmo toma como base la lógica de los sistemas Lindenmayer con el fin de crear formas en dos dimensiones para ser optimizadas a través de un algoritmo genético. Posteriormente se evidencian los diversos comportamientos de dichas formas en cuanto a la disipación de calor, por medio de simulaciones térmicas en el toobox PDEtool de Matlab.

Palabras clave: Algoritmo genético, disipador de calor, Matlab, morfogénesis, sistemas Lindenmayer

This paper, presents the results of a research project that aims to develop the design of a heat sink, optimized for the proportions of the package for transistors TO-220, through an algorithm morphogenesis performed in Matlab. This algorithm builds on the logic of Lindenmayer systems in order to create shapes in two dimensional for to be optimized through genetic algorithms. Subsequently allows to show various behaviors of such forms to the head transfer, through thermal simulations in Matlab PDEtool toolbox.

Keywords: Genetic algorithm, heat sinks, Lindenmayer systems, Matlab, morphogenesis

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016
Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756
Cómo citar: Amado, J., Garay, C. y Martínez, F. (2016). *Implementación de un algoritmo de morfogénesis para el diseño de disipadores de calor*. Revista Tekhnê, 13(1), 31-40.

Introducción

La morfogénesis, es un proceso biológico por medio del cual los seres vivos u organismos desarrollan su forma física en un proceso de crecimiento o evolución (Roudavski, 2009). Un ejemplo de las funciones o resultados de la morfogénesis en seres vivos es la creación de patrones para la pigmentación, desarrollo de extremidades, distribución de ramificaciones del sistema nervioso, entre otras. Es así como basados en este proceso se realizan adaptaciones de tipo computacional para poder obtener una estructura mecánica que sea objeto de análisis para esta investigación.

Los algoritmos genéticos, o bio-inspirados en genética, consisten en un método de ajuste por el cual se busca optimizar y resolver diferentes situaciones o problemas. Basta con conocer su nombre para identificar que el método de operación de estos algoritmos está basado o inspirado en procesos genéticos reales de los seres vivos (Gómez y Maldonado, 2011). Al modelar los individuos y la población en el algoritmo, por medio del principio de selección natural y supervivencia de Darwin (Fraile, 2011), serán los individuos más fuertes los que sobrevivan más tiempo y tengan mayor posibilidad de reproducción, asegurando mejores individuos en cada etapa del proceso. Esto se refleja en mejores soluciones para el problema que se esté solucionando, ya que cada individuo representa una posible solución y es el algoritmo el que optimizará la mejor de ellas. Por estas razones es que se hace posible realizar un algoritmo de morfogénesis combinándolo con las herramientas de los algoritmos genéticos.

Es así como se realizó el diseño de la estructura y base del algoritmo de morfogénesis a través de un sistema L o sistema Lindenmayer, enmarcado en la estructura de los fractales. Esto se realizó dado que el sistema L trabaja la estructura y creación de formar, lo que es un buen punto de partida para el algoritmo. Así mismo, este sistema brinda la facilidad en su codificación de reproducirlo por medio de un genoma o código genético, establecido en el algoritmo genético (Martínez, Martínez, y Montiel, 2016).

Existen diversas posibilidades para aplicar un algoritmo de morfogénesis. Sin embargo, cuando se realiza un enfoque en la rama de la electricidad, dichas posibilidades se reducen por múltiples razones. La principal recae en que los algoritmos de morfogénesis son ideales para trabajarlos en diseños de componentes mecánicos o estructuras, es así como en su mayoría ya están estandarizados y optimizados, por lo que se creería que no habría un diseño diferente del ya existente.

Algunos de los componentes mecánicos en la electricidad que podrían ser diseñados por un algoritmo de morfogénesis son los disipadores de calor, los núcleos de transformadores, las estructuras de los motores jaula de ardilla, entre otros.

Teniendo en cuenta los parámetros referentes a un motor jaula de ardilla, se hace complejo abordar este componente, ya que se deben manejar las tres dimensiones frente al plano cartesiano (*x*-*y*-*z*), diferentes materiales, etc. En cuanto al núcleo del transformador, es un componente de uso frecuente en la industria de la electricidad, y se previó una solución no muy distante de los diseños ya existentes, debido a que ya se encuentran normalizados y optimizados.

Considerando los aspectos anteriores, el disipador de calor es un componente con el que se puede asociar un algoritmo de morfogénesis, sin generar traumatismos, en cuanto a resultados y procesos del algoritmo, ya que se puede modelar en dos dimensiones del plano cartesiano facilitando así los procesos del algoritmo de morfogénesis, permitiendo trabajar con menos datos de los usualmente requeridos, y a su vez facilita la simulación de formas frente a la reacción del calor, gracias al tolboox PDEtool de MatLab.

La configuración interna establecida en diferentes dispositivos electrónicos que conforman otro tipo de aparatos tecnológicos, ha llevado a concentrar cantidades altas de temperatura en estos artefactos, un ejemplo son los circuitos integrados en procesadores de computadores, y por ejemplo, en el caso particular del transistor con encapsulado TO-220.

La necesidad de reducir tamaños de los componentes y aumentar cantidades de procesamiento y eficiencia de las máquinas ha llevado a acumular un gran número de transistores y otros elementos en circuitos integrados, esto en áreas muy pequeñas. La ley empírica de Moore es una predicción que describe muy bien este fenómeno (Garro et al., 2012), dado que esta establece que en un intervalo de tiempo aproximado de cada dos años se presentará una duplicación en la cantidad de transistores en un circuito integrado.

Teniendo en cuenta la construcción y funcionamiento de los transistores, estos dispositivos electrónicos permiten el paso de corriente por su estructura, ya que soporta una ganancia en intensidades de corriente alta y debido a su resistencia interna (esto dependiendo de su configuración y el tipo de transistor) tiene que disipar una potencia considerable. Gracias al efecto Joule (Edminister, 1998) si esto sucede en diversos transistores, en una misma superficie se acumula suficiente temperatura, capaz de averiar los circuitos integrados y el funcionamiento de los dispositivos de los que estos hagan parte. Con base en este tipo de situaciones, se ha enfocado esta investigación en la creación de un algoritmo que diseñe posibles disipadores de calor que puedan contribuir a la solución de este problema en los transistores, dada la importancia de los elementos tecnológicos en la actualidad.

Los disipadores de calor se diseñan partiendo de las fuentes de temperatura y la cantidad calor a disipar. Es así como se debe tener en cuenta el método de disipación, por ejemplo, contacto con aire o fluidos. También se debe tener en consideración el material con el que se va a fabricar el disipador, ya que un buen disipador de calor depende del

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

material de fabricación y las dimensiones geométricas con las que se construye. La disipación térmica por convección es la más común en este tipo de casos, ya que permite que el calor pase de la fuente a través de un material conductor de calor y se disipe por medio de un fluido de enfriamiento, generalmente aire. Teniendo en cuenta este tipo de disipación, el disipador de calor cuenta con unas aletas que aumentan el contacto con este fluido.

Para optimizar el diseño de disipadores de calor son considerados principalmente factores como la longitud, ancho, altura, espesor y número de aletas que tendrá el dispositivo. En (Garro et al., 2012) se establece que las dimensiones de mayor importancia en un dispositivo de transferencia de calor estándar (rectangular compacto con aletas rectangulares rectas de sección uniforme) son la variación de la longitud (21,87 %), de la altura (27,58 %) y del ancho (27,53 %).

Para suplir esta necesidad de transferir el calor de los dispositivos al exterior, se emplean usualmente tres métodos de disipación térmica tales como:

- La conducción, la cual se enfatiza en la capacidad de calor que el dispositivo es capaz de transmitir naturalmente desde la fuente de calor hasta el exterior.
- La convección, entendida como la transferencia de calor empleando los *microcanales por los cuales se hace pasar un fluido a través de canales con diámetros hidráulicos entre 10 a 200 (μm). Tuckerman y Peases desarrollaron trabajos experimentales con estos dispositivos, obteniendo un coeficiente convectivo haciendo pasar agua en flujo laminar dentro de estos dispositivos* (León, Rubio, Hernández, y Rubio, 2007).
- Radiación, básicamente busca la transmisión de calor a través de ondas electromagnéticas, las cuales son emitidas por estos cuerpos calientes. *El calor se transfiere mediante emisiones electromagnéticas que son irradiadas por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 (^oK)* (Rashid, 1999).

Parámetros para el cálculo de disipadores de calor

Los parámetros relevantes para el cálculo son:

- La resistencia térmica entre la cápsula y el disipador (*RTHchs*).
- La resistencia térmica interna entre la unión y la cápsula (*RTHjc*).
- La pérdida de potencia en el semiconductor (*W*).
- La resistencia térmica entre disipador y ambiente (*RTHhsa*)

El concepto de dichos valores puede representarse de forma similar a la asociación de resistencias, como se indica en la Fig. 1.

Dónde:

- *W* hace referencia a la potencia disipada
- *Tj* a la temperatura en la unión

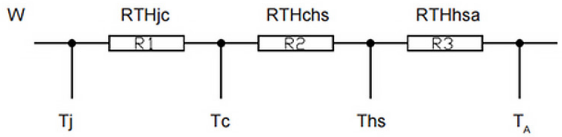


Figura 1. Modelamiento eléctrico de un disipador de calor.

- *Tc* a la temperatura de la cápsula
- *Ths* a la temperatura del disipador, y por último
- *TA* hace referencia a la temperatura ambiente.

El incremento de temperatura de la unión esta expresado por la ecu. 1.

$$\triangle Tj = W \times (RTHjc + RTHchs + RTHhsa) \quad (1)$$

La temperatura de la unión se expresa en la ecu. 2 como:

$$Tj = TA + \triangle Tj \acute{o} Tj = W \times (RTHjc + RTHchs + RTHhsa) + TAc \quad (2)$$

En el cálculo inverso, la resistencia térmica del disipador a utilizar (*RTHhsa*) será (ecu. 3):

$$RTHhsa = \left(\frac{(Tj - TA)}{W}\right) - (RTHjc + RTHchs) \quad (3)$$

Para el cálculo de disipación de los semiconductores pueden utilizarse las expresiones indicadas a continuación. Para el caso de transistores se emplea la ecu. 4:

$$W = VCE \times ICE \quad (4)$$

Para transistores de potencia se emplea la ecu. 5:

$$W = VCE \times ICE + VBE \times IBE \quad (5)$$

Donde *W* es la potencia disipada, *VCE* es la caída de tensión en el transistor e *ICE* es la corriente de trabajo. En el caso de transistores de potencia también se tiene en cuenta la tensión base-emisor (*VBE*) y la corriente base-emisor (*IBE*).

Para realizar el cálculo en diodos y tiristores se emplea la ecu. 6:

$$W = V0 \times I + I2 \times FF2 \times r0 \quad (6)$$

Donde *W* es la potencia disipada en vatios, *V0* es el valor de cálculo (indicado por el fabricante) en voltios, *I* es la corriente de trabajo en A, *FF* es el factor de forma de la onda (depende del circuito de aplicación) y *r0* es la resistencia equivalente (indicada por el fabricante) en Ohmios (Miraya, 2006).

Metodología

La elaboración de este algoritmo de morfogénesis se realizó con la herramienta computacional MatLab, a través de la implementación de los algoritmos genéticos, los cuales tienen la función de interactuar en conjunto con el algoritmo encargado de realizar los modelos y gráficos, implementando así el método de sistemas Lindenmayer. Con este método se crean cadenas, axiomas y reglas iniciales las cuales empiezan a interactuar dentro del algoritmo genético creando para cada iteración un modelo o una forma, esto con la ayuda de Gatool, que es el Toolbox de MatLab para trabajar con algoritmos genéticos. Posteriormente estos diseños son evaluados en términos de disipación de calor, para lo cual se hace uso del Toolbox de Elementos Finitos con el que cuenta MatLab, PDEtool. Dadas las propiedades de esta herramienta y las características de diseños del disipador de calor, MatLab se presenta como la opción más viable para realizar este algoritmo por tener todas las herramientas necesarias y requeridas por dicha aplicación.

Los resultados del Toolbox de Elementos Finitos son comparados con una simulación de un modelo estándar de un disipador de calor convencional, permitiendo evidenciar si las formas obtenidas realizaron algún tipo de progreso, retroceso o por el contrario se mantuvieron estáticas en comparación al modelo estándar. La tabla 1 muestra un diagrama de flujo del algoritmo.

Tabla 1
Diagrama de flujo del algoritmo.

Sistemas Lindenmayer

El concepto de sistema de Lindenmayer fue concebido por el biólogo y botánico teórico húngaro Aristid Lindenmayer de la Universidad de Utrecht, en 1968, sin embargo, fueron dos de sus estudiantes Ben Hesper y Pauline Hogeweg los primeros en darse cuenta del potencial de los sistemas Lindenmayer para representar plantas (en un principio). En 1970, Hesper y Hogeweg en dos semanas crearon el primer programa que, a partir de una secuencia de 5.000 caracteres generados por un sistema Lindenmayer, imprimió algo que se parecía mucho a una hoja vegetal (Campos, 2011).

Básicamente los sistemas Lindenmayer o sistemas L son un tipo de lenguaje gramatical que consta de un conjunto de reglas y símbolos. Estos sistemas fueron utilizados inicialmente para modelar los procesos de crecimientos en los árboles y plantas, aunque con el pasar de los años se contempló que este método fuese apropiado para desarrollar y modelar cualquier tipo de morfología para diferentes organismos u objetos.

El principio fundamental de los sistemas Lindenmayer es la sobre escritura, la cual consiste en reemplazar partes sucesivamente de una forma u objeto simple, con una serie de reglas de remplazo.

Los sistemas Lindenmayer están definidos por la expresión (ecu. 7):

$$G = \{V, S, w, P\} \tag{7}$$

Dónde:

- V: Es el conjunto de símbolos los cuales pueden ser reemplazados, siendo empleados para componer cadenas.
- S: Es el conjunto de símbolos que son constantes.
- w: Corresponde al axioma la cual hace referencia a la cadena inicial del sistema.
- P: Reglas de que se le aplican sucesivamente al sistema (Cervantes, Rodríguez, y Landois, 2002).

Para la implementación de este algoritmo de morfogénesis se adoptó este método por la facilidad con la cual el algoritmo genético interactúa con los sistemas Lindenmayer creando formas mediante una cierta cantidad de iteraciones. El axioma seleccionado para este algoritmo fue *F-F++F-F* (Fig. 2).

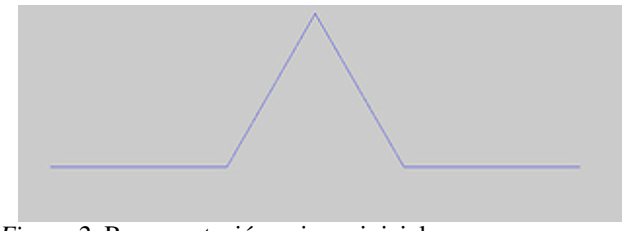


Figura 2. Representación axioma inicial.

Para entender más específicamente el funcionamiento básico de este sistema se puede observar el siguiente ejemplo. Cuando al algoritmo se le asigna una regla la cual corresponde a reemplazar cada carácter F por la cadena *F-F++F-F*, se obtiene la Fig. 3.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

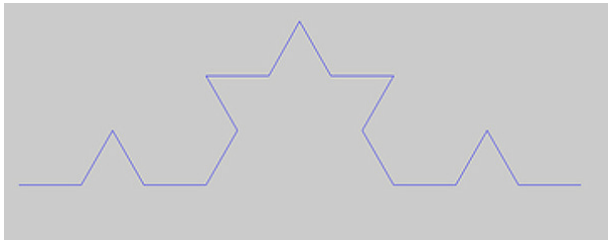


Figura 3. Representación axioma segunda iteración.

Y al realizar una siguiente iteración se obtiene la siguiente forma (Fig. 4):

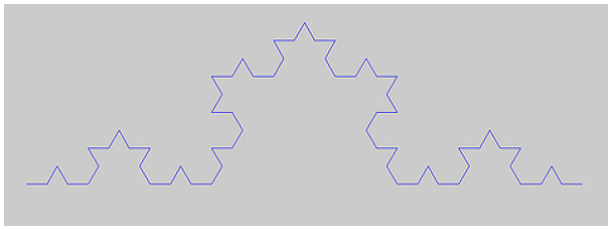


Figura 4. Representación axioma tercera iteración.

Para este algoritmo de morfogénesis se ha utilizado como base para el diseño primario de formas un código de MatLab expuesto en (Land, 2006), en el cual los autores desarrollaron un algoritmo para observar, graficar y proyectar el crecimiento de árboles y plantas. Este código esta compuesto por dos fases. La primera fase calcula las sustituciones de cadenas, y la segunda realiza la interpretación geométrica. Todo este proceso está fundamentado en los sistemas Lindenmayer.

Para poder dar el enfoque deseado, se realizaron algunas modificaciones al código. Una de ellas fue el trabajar con axiomas y reglas, que arrojaran una figura de proporciones simétricas para así poder controlar que la forma deseada iniciara y finalizara en un mismo valor para *Y* en un sistema coordenado. Se realizó un dimensionamiento de un valor unitario en el eje *X* para así adecuar la figura al tamaño real en centímetros del empaquetado TO-220. Arrojando resultados o formas iniciales ilustrados en las siguientes figuras (Figs. 5, 6, 7 y 8).

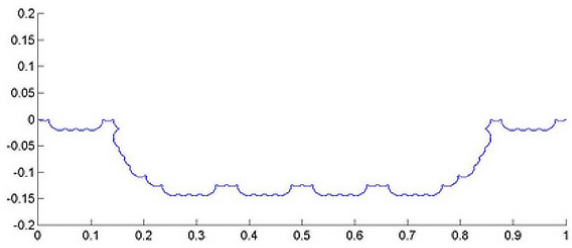


Figura 5. Ilustración primeros resultados en sistemas coordenados.

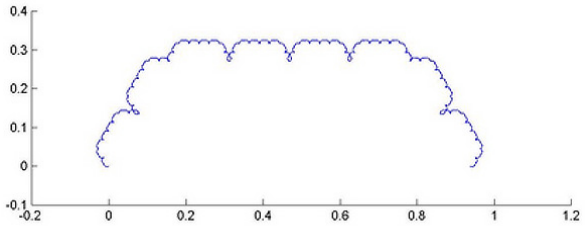


Figura 6. Ilustración primeros resultados en sistemas coordenados.

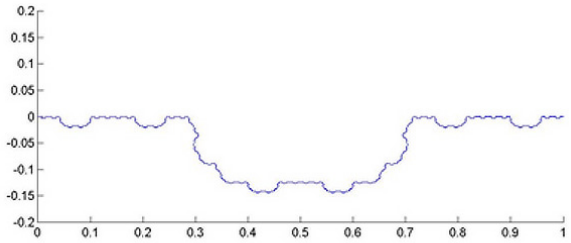


Figura 7. Ilustración primeros resultados en sistemas coordenados.

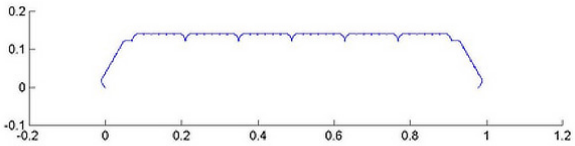


Figura 8. Ilustración primeros resultados en sistemas coordenados.

Algoritmos genéticos

Los algoritmos bio-inspirados usan analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, de los cuales cada uno representan una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le da una calificación que evalúe la validez de dicha solución, cuanto mayor sea la adaptación del individuo al problema, mayor será la probabilidad de ser seleccionado para reproducirse cruzando su material genético con otro individuo igualmente seleccionado. De esta manera se produce una nueva generación de posibles soluciones las cuales entrarán a reemplazar a las antiguas soluciones, así asegurando siempre que los mejores individuos sean los que tengan la posibilidad de cruzarse avanzando en la solución del problema (Dartnell, 2008).

Para este algoritmo genético se cuenta con una función de creación que se denominó *Caracteres_creacion*, la cual

es la encargada de crear cadenas o axiomas con un número de 20 caracteres. Estas cadenas son creadas partiendo de un vector de números enteros aleatorios del 0 al 2, los cuales son cambiados después por los caracteres *F*, + y – respectivamente.

Mutación. Consiste en la alteración de un bit esta alteración lo puede cambiar de 0 a 1 o viceversa, el propósito de este operador de mutación es la creación de un individuo ligeramente distinto alterando levemente su genotipo, este individuo tendrá muy pocas variaciones comparándolo con su progenitor (Holland, 1992).

En esta función denominada *Caracteres_mutacion* dentro del algoritmo genético es la encargada de determinar mediante condiciones y parámetros de diseño cual debe ser el carácter o gen para ser transformado creando una cadena o axioma totalmente distinto.

Recombinación. Es considerado el operador principal de los algoritmos genéticos. Su intención es la combinación de dos o más individuos progenitores. La ventaja de este operador es la interacción de sub-cualidades de los individuos, para así ir creando a la misma vez individuos con cualidades diferentes pero favorables para la población. Este operador es controlado o se rige por un parámetro conocido como tasa de cruce. Los operadores de recombinación más conocidos son de un punto, dos puntos y puntos múltiples (Holland, 1992).

Cruce. Esta función denominada *Caracteres_cruce* en este algoritmo es la encargada de determinar el punto por el cual se realiza el cruce, garantizando a su vez la creación de un nuevo axioma a partir de dos axiomas padres, una vez el algoritmo genético ha corrido todas estas funciones creando axiomas los cuales serán enviados a una misma función del algoritmo genético, que toma estas formas y las evalúa a fin de entregar las mejores soluciones posibles.

Una vez se ha obtenido una posible solución o modelo, este es tratado mediante un procesamiento de imágenes con la finalidad de garantizar ciertas condiciones. Se inicia por agregar tres líneas, las cuales corresponden a la base y los dos extremos del modelo, esto para que sea una única pieza. Luego se procede a pasarlo por una función para volverlo un sólido y así eliminar los posibles puntos de cruce si llegasen a existir. Asimismo, se le realizan dilataciones para garantizar un mínimo de altura con respecto a la base. Por último se procede a volverla lo más fina posible (Figs. 9, 10 y 11).

Este último paso se realizó pensando en obtener información relevante de la imagen, descartando puntos innecesarios que pudieran afectar el buen desarrollo del proceso. Una vez obtenida la mejor imagen posible se procede a determinar los puntos en un plano coordenado y así poder llevarlo al Toolbox Elementos Finitos PDE, en el cual se realizarán las simulaciones térmicas de estas posibles soluciones. Esta simulación muestra la manera en que esta solución disipa el calor.

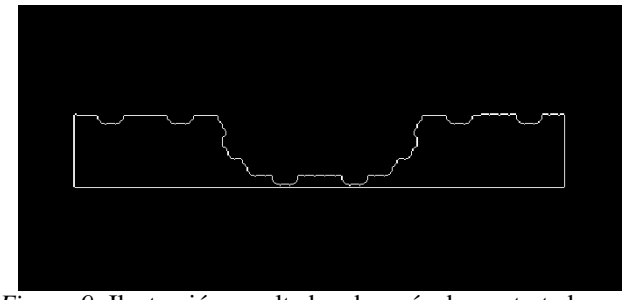


Figura 9. Ilustración resultados después de ser tratados por el algoritmo de tratamiento de imágenes.

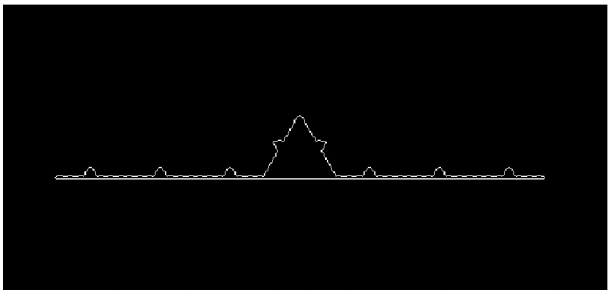


Figura 10. Ilustración resultados después de ser tratados por el algoritmo de tratamiento de imágenes.

Figura 11. Ilustración resultados después de ser tratados por el algoritmo de tratamiento de imágenes.

Función de fitness y parámetros del algortimo de morfogénesis. La función de fitness es la que se encarga dentro del algoritmo genético de determinar cuándo una posible solución es buena o no lo es, teniendo en consideración múltiples parámetros. Para el algoritmos que atañe a este artículo, dicha está construida a partir de la relación temperatura - longitud, y la penalización a las figuras con más de cuatro puntos de cruce en su estructura. Dicha función es (ecu. 8):

$$f(x) = \sum \sqrt{(Xi - X(i+1))^2 + (Yi - Y(i+1))^2} + k \times p \quad (8)$$

Donde k es la constante de penalización y p es el número de puntos de cruce hallados mediante procesamiento de imágenes.

Los parámetros con que se construyó este algoritmo son:

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

- Tamaño de la población: 50
- Algoritmo de selección estocástico uniforme
- Contador de élite 0.05 × tamaño población
- Porcentaje de cruce: 80 %
- Porcentaje de mutación: 2 %

En el Toolbox de elementos finitos de MatLab se seleccionó la modalidad de transferencia de calor (*Head transfer*), para trabajar el PDEtool en concordancia con los requerimientos de este proyecto. Esta modalidad expone las siguientes ecuaciones diferenciales de calor:

- Tipo elíptico (estado estacionario, ecu. 9):

$$-div\ (k \cdot grad\,(T)) = Q + h \cdot (T - T) \qquad (9)$$

El valor de h siendo nulo en el PDEtool.

- Tipo parabólico (estado no estacionario, ecu. 9):

$$\rho \cdot Cp \cdot T - div\,(k \cdot grad\,(T)) = Q + h \cdot (T\infty - T) \qquad (10)$$

El valor de h siendo nulo en el PDEtool (Whitley, 1993).

Diseño propuesto. Para efectos de la simulación térmica se emplearan los datos de coeficiente térmico de materiales que son normalmente utilizados por los actuales fabricantes de disipadores de calor. Se propone realizar las correspondientes simulaciones con los valores proporcionados por la tabla 2 tomada de (Ziman, 2005), en la cual se brindan los datos relacionados con las propiedades térmicas de una serie de materiales. Para la aplicación específica, se emplearan los datos del aluminio ya que es uno de los materiales usualmente más utilizados por la industria.

Resultados

Se realizó un análisis de la relación entre la longitud de todo el borde de las figuras arrojadas por el algoritmo de morfogénesis con la temperatura que disipan. Para obtener estos diseños se trabajó con un ángulo fijo de 90 grados en las condiciones del algoritmo de Lindenmayer. Este análisis se hizo tomando cuatro figuras básicas y estándar relacionadas en las Figs. 12, 13, 14 y 15.

Posteriormente a simular dichas figuras, se realizó un promedio de la temperatura almacenada en los bordes de las mismas para así poder determinar una relación entre la longitud del diseño y su nivel de temperatura. De allí se obtiene que:

- La Fig. 12 cuenta con una temperatura promedio de 42.10673 ^{0}C y una longitud de borde de 5.6 cm.
- La Fig. 13 cuenta con una temperatura promedio de 63.4521 ^{0}C y una longitud de borde de 3.1 cm.
- La Fig. 14 cuenta con una temperatura promedio de 71.6024 ^{0}C y una longitud de borde de 2 cm.
- La Fig. 15 cuenta con una temperatura promedio de 52.1998 ^{0}C y una longitud de borde de 3.8 cm.

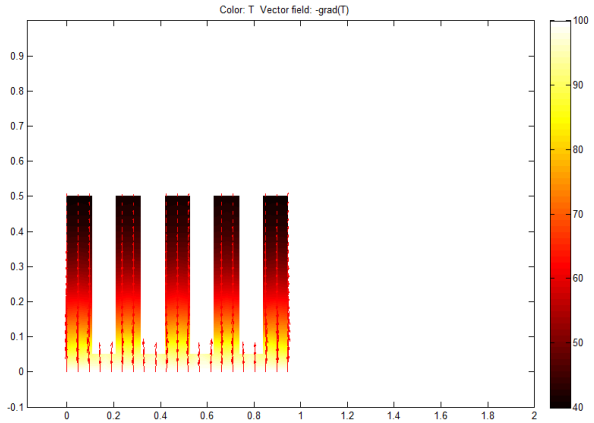


Figura 12. Simulación térmica de un disipador de calor estándar.

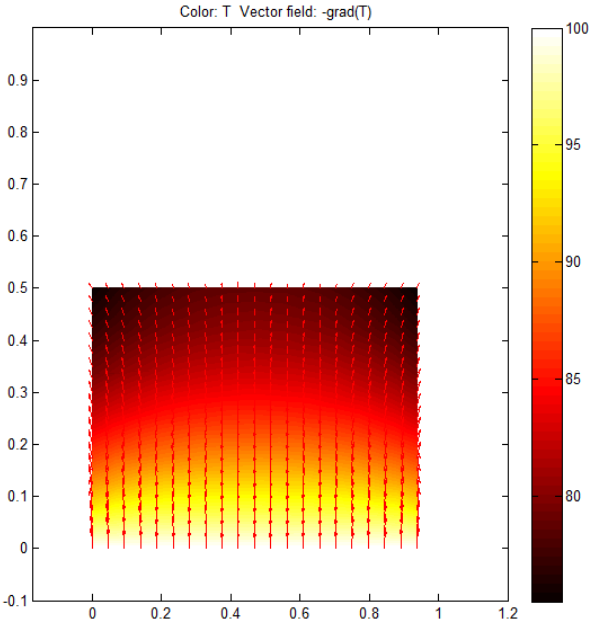


Figura 13. Simulación térmica de un disipador de calor macizo.

Obtenidos estos resultados se dedujo la función en la Fig. 16, con la que se comprueban los resultados de las simulaciones térmicas de las figuras arrojadas por el algoritmo genético.

A continuación se muestran las simulaciones realizadas para las figuras entregadas por el algoritmo de morfogénesis, en las cuales se entrega el valor de temperatura promedio y longitud, para ser relacionados en este análisis.

La Fig. 17 cuenta con una temperatura promedio de 39.8547^{0}C y una longitud de borde de 6.16 cm, con una mejoría respecto al disipador de calor estándar de 5,35 %.

Tabla 2
Propiedades térmicas en metales comunes.

Metal	Specific Heat - c_p		
	(kJ/kg K)	*(kcal/kg^{0}C)*	*(Btu/lb$_m$^{0}F)*
Aluminum	0.91	0.22	0.22
Antimony	0.21	0.05	0.05
Barium	0.20	0.048	0.048
Beryllium	1.83	0.436	0.436
Bismuth	0.13	0.03	0.03
Cadmium	0.23	0.055	0.055
Calsium	0.63	0.15	0.15
Carbon Steel	0.49	0.12	0.12
Cast Iron	0.46	0.11	0.11
Cesium	0.24	0.057	0.057

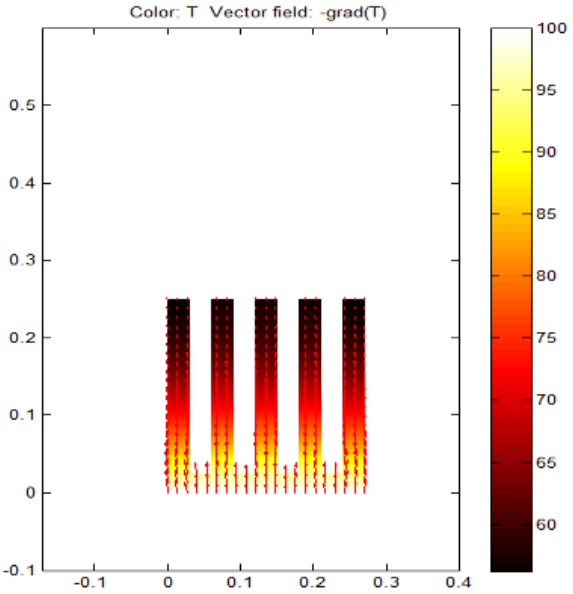


Figura 14. Simulación térmica de un disipador de calor con poca altura.

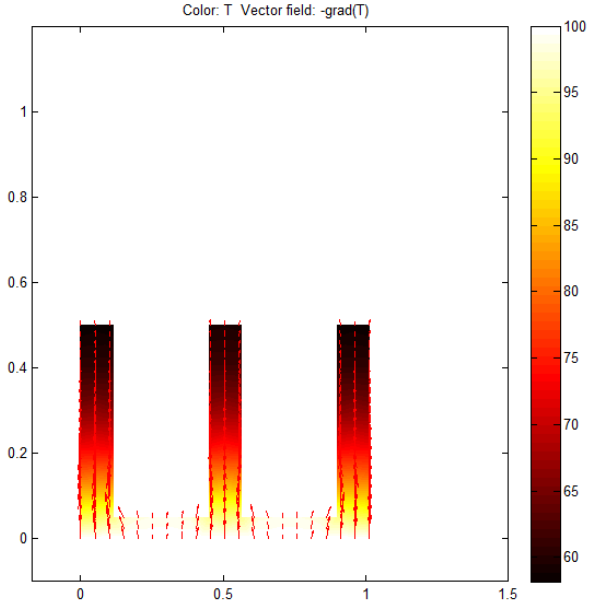


Figura 15. Simulación térmica de un disipador de calor con mayor espacio.

La Fig. 18 cuenta con una temperatura promedio de 37.6785^{0}C y una longitud de borde de 7.36 cm con una mejoría respecto al disipador de calor estándar de 10,51 %.

La Fig. 19 cuenta con una temperatura promedio de 43.3568^{0}C y una longitud de borde de 5.36 cm, empeorando respecto al disipador de calor estándar un 2,97 %.

La Fig. 20 cuenta con una temperatura promedio de 41.5689^{0}C y una longitud de borde de 5.68 cm, con una mejoría respecto al disipador de calor estándar de 1,27 %.

Utilizando el método comparativo de análisis, se determinó que estas son soluciones óptimas ya que dos de estas se encuentras con temperaturas por debajo del promedio, y las otras dos con temperaturas que están muy cerca al valor más bajo de este promedio.

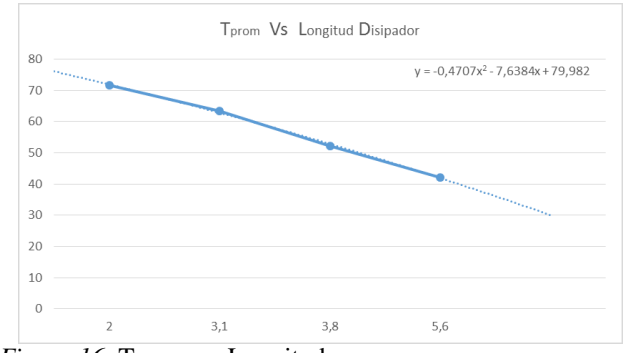


Figura 16. Tprom vs Longitud.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

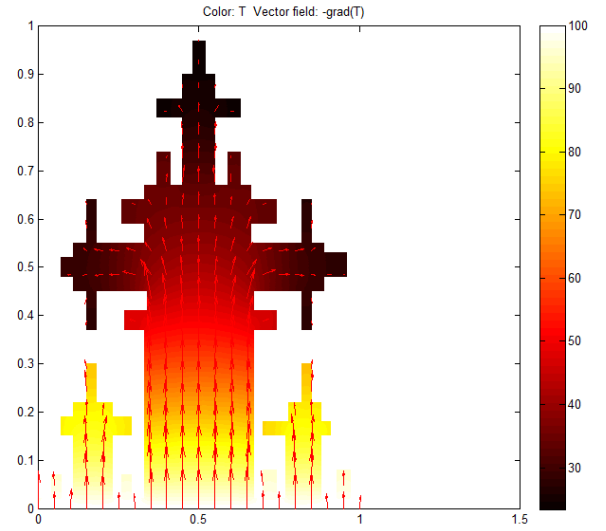


Figura 17. Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético.

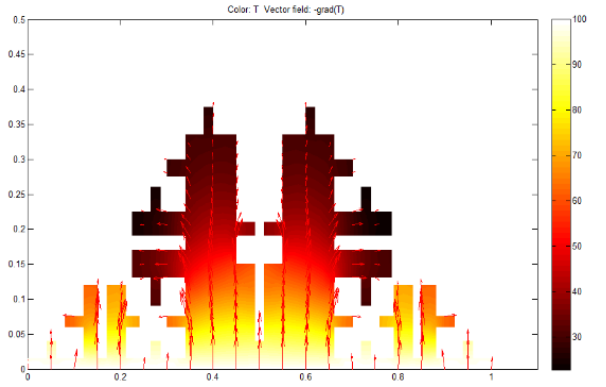


Figura 18. Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético.

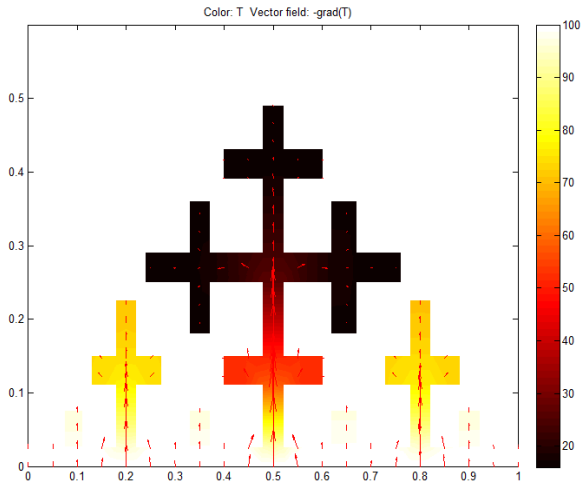


Figura 19. Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético.

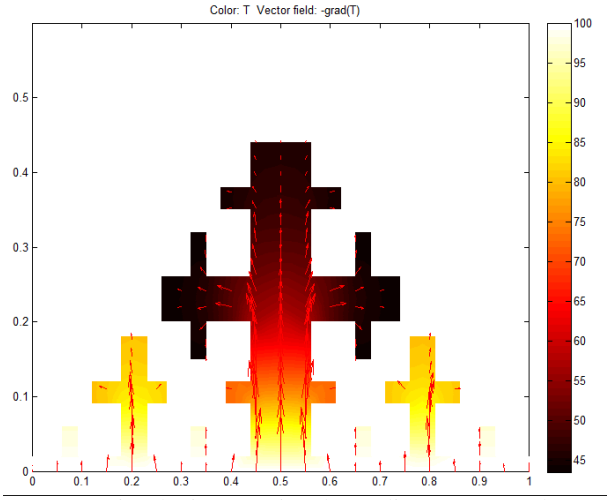


Figura 20. Simulación térmica de un diseño entregado por el algoritmo genético.

Trabajo futuro

Realizar el mejoramiento de la función de Fitness del algoritmo de morfogénesis para incluir el proceso de minimizar el área de los diseños entregados por este algoritmo.

Dada la forma poco convencional de los diseños entregado por el algoritmo de morfogénesis, realizar un estudio económico para determinar la viabilidad de la construcción de estos diseños.

Conclusiones

La longitud del corte axial de las figuras entregadas por el algoritmo de morfogénesis tiene una relación proporcional a la capacidad de disipación de calor. Muestra de ello son las mejoras en 5,35 % y 10,51 % de los diseños registrados en las Figs. (17) y (18).

De los resultados obtenidos en varias de las simulaciones térmicas realizadas se evidencia que no solo se debe maximizar la longitud del corte axial de la figura sino que también hay un buen resultado cuando el área de la figura es la menor posible.

Se evidencia que es viable la construcción de un algoritmo de morfogénesis, soportado en el uso de los sistemas Lindenmayer y los algoritmos genéticos.

Referencias

Campos, D. (2011). *Introducción a los sistemas de lindenmayer: fractales, autómatas celulares y aplicaciones.* (Universidad Autónoma de Puebla - México)

Cervantes, A., Rodríguez, Y., y Landois, L. (2002). LINSIS: Sistema lindenmayer y gramáticas formales, una opción para modelar formas vegetales. *Comunicaciones en Socioeconomía Estadística e Informática*, *6*(2), 51-135.

Dartnell, L. (2008, March). *Matrix: Simulating the world part ii: cellular automata.* On line. Descargado de `https://plus.maths.org/content/`

Edminister, J. (1998). *Circuitos eléctricos*. McGraw-Hill Companies.

Fraile, M. (2011). *Morfogénesis digital. la creación de un paradigma sostenible.* (Universidad de Buenos Aires)

Garro, S., Díaz, L., Jian, L., Martínez, F., Meneses, W., Ortega, H., y cols. (2012). Modelación y simulación de disipadores de calor para procesadores de computadora en comsol multiphysics. *Tecnología en Marcha*, *25*(3), 70-80.

Gómez, N., y Maldonado, C. (2011). Sistemas bio-inspirados: Un marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos. *Documentos de investigación*, *112*(1), 6-17. (Universidad del Rosario)

Holland, J. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. The MIT Press.

Land, B. (2006, December). *Bionb 441 - computing for neurobiology.* On line. Descargado de `https://courses.cit.cornell.edu/bionb441/`

León, J., Rubio, C., Hernández, A., y Rubio, J. (2007). Disipación de calor en microcanales de tipo trapezoidal con diferentes razones de aspecto. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, *2*(5), 169-176.

Martínez, F., Martínez, F., y Montiel, H. (2016). Automatic design of heat sink using genetic algorithms, lindenmayer systems and digital image processing. *Proc. SPIE 10033 Eighth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2016)*, 1-6. (doi:10.1117/12.2246540)

Miraya, F. (2006). *Disipación de potencia.* (Universidad Nacional de Rosario - Argentina)

Rashid, M. (1999). *Electrónica de potencia - circuitos, dispositivos*. Prentice Hall.

Roudavski, S. (2009). Towards morphogenesis in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, *7*(3), 345-374.

Whitley, D. (1993). *Foundations of genetic algorithms* (Vol. 2). Elsevier.

Ziman, J. (2005). The thermal properties of materials. *Scientific American*, *217*(3), 271-284.

CC BY NC ND

Revista Tekhnê
Enero - Junio 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 41– 56
© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Prototipo de sistema de alimentación para equipos portátiles aprovechando la energía eólica

Power system prototype for laptops harnessing wind energy

Óscar M. Velásquez B.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
omvelasquezb@correo.udistrital.edu.co

Este artículo presenta un modelo de generación y regulación de energía eléctrica para alimentar dispositivos con potencia igual o menor a 80 W. El sistema flexible de suministro de energía eléctrica es una alternativa para suplir necesidades de alimentación de equipos o dispositivos de baja potencia, por ejemplo, equipos móviles. Este sistema aislado de energía eléctrico está conformado por un controlador de carga de baterías, un banco de baterías, convertidor DC/AC, un rectificador de onda completa y un generador eléctrico de imanes permanentes de 10 W - 12 V. En este trabajo se documenta los criterios necesarios para la construcción del prototipo con simulación de las partes del generador con un software de elementos finitos. Además, se describe las pruebas de laboratorio a los diferentes componentes del prototipo.

Palabras clave: Aerogenerador, convertidor de potencia, regulación de voltaje, viento

This paper presents a generation model and electrical energy regulation to supply devices up to 80 W. The electrical power flexible system is an alternative to supply needs of power for low-power devices, such as mobile equipment. This stand-alone power system is comprised of a battery charge controller, a battery bank, a DC/AC converter, a full wave rectifier and a permanent magnet generator 10 W - 12 V. In this work has been documented the criteria necessary for the construction of the prototype with simulation of generator parts in a finite element software. In addition, laboratory tests were made to the components of the prototype.

Keywords: Power converter, voltage regulation, wind, wind turbine

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016
Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756
Cómo citar: Velásquez, O. (2016). *Prototipo de sistema de alimentación para equipos portátiles aprovechando la energía eólica*. Revista Tekhnê, 13(1), 41-56.

Introducción

El uso de los computadores, reproductores y celulares dentro de los espacios de interacción social es cada vez mayor. Ya sea para el caso uso de la comunicación, de forma académica o simplemente para actividades de ocio.

Los equipos móviles se descargan rápida y continuamente, el tiempo de servicio es proporcional al uso del equipo. Los smartphones, por ejemplo, utilizan baterías recargables electro-químicas. Estas pueden ser de iones de litio (Li-ion) o de polímeros de litio (Li-po). Una desventaja de la tecnología de esta clase de baterías es su corta duración con los dispositivos móviles cuando se usan forma continua (Rocabado, Díaz, y Cadena, s.f.).

El manejo diario y excesivo de estos equipos portátiles genera un consumo apreciable (energético y monetario). Esto permite pensar en la necesidad de una fuente de alimentación versátil, de bajo costo y fácil acceso. Ésta es una razonable inversión que se puede recuperar a corto plazo y ganancia por varios años.

Actualmente los usuarios de equipos portátiles dependen de fuentes de tensión de la red local (red pública) para alimentar dispositivos portátiles. Muchas veces, los puntos de conexión eléctricos no son accesibles o son facturados a otro usuario.

El acceso a fuentes eléctricas a partir de energías renovables no es sencillo para el usuario común. Cuando se hace referencia a mecanismos de energía limpia, estos se asocian con altos consumos de energía en zonas aisladas donde el presupuesto de inversión se justifica.

Sin embargo, si se habla de pequeños prototipos y micro-generación se puede optar por un sistema de alimentación, por ejemplo, basado en energía eólica. De lo anterior, sería una forma factible de suplir la necesidad de cargar las baterías de equipos portátiles.

En la tabla 1 clasifica la potencia eléctrica para la generación de energía por medio de sistemas eólicos, foto voltaicos y mixtos, en adición, proporciona algunos lugares donde se presenta estos sistemas de energía o como sistemas mecánicos.

Un sistema flexible de suministro de energía eléctrica, desde lo más básico, es una agrupación de elementos que tiene como objetivo llevar energía eléctrica hasta un lugar dado. Para esto, se debe generar, transportar y distribuir la energía eléctrica hasta el usuario final. Además, el sistema está dotado de dispositivo de regulación, protección y visualización.

Visto de esta manera, cada una de las partes debe ser dimensionada y acoplada con las características y especificaciones de uso (potencia, tensión eléctrica, corriente, entre otras). Por esta razón, y para darle un objetivo a la energía eólica, se modela a modo de generador y una turbina para formar un aerogenerador.

Por separado a la generación, se implementa elementos adicionales para un control y regulación del almacenamiento de la energía eléctrica a un banco de baterías. Este banco de baterías tiene como propósito, proporcionar la potencia suficiente para el recargar las baterías de los dispositivos móviles.

Como resultado, para suministrar esta energía eléctrica a los usuarios de una forma convencional (salida de tomacorriente), se adhiere un dispositivo para la transformación de energía a la salida del sistema.

Este artículo expone la forma en que se construyó el modelo de generación eólica más adecuado, según los autores, para la necesidad antes descrita. En la Fig. 1 muestra las partes del prototipo de un sistema flexible de suministro de energía eléctrica.

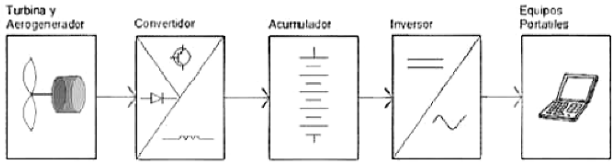


Figura 1. Modelo del sistema flexible de suministro de energía eléctrica.

Formulación del problema

El grupo de investigación Arquitecturas Modernas para Sistemas de Alimentación (ARMOS) y el Semillero de Investigación en Electrónica de Potencia de la Universidad Distrital (SIEPOT) están interesados en desarrollar prototipos de generación de energía, implementando sistemas renovables. En este sentido, ha mirado como posible nicho de mercado el consumo de energía eléctrica por parte de equipos electrónicos portátiles. Una posible evolución de este tipo de sistemas contempla los kioscos de carga para vehículos eléctricos.

Un sistema de alimentación, por ejemplo, basado en energía eólica, es una forma factible de suplir la necesidad de cargar las baterías de equipos portátiles, y constituye un desarrollo tecnológico importante para la Universidad Distrital como ente promotor de la investigación de procesos académicos reflexivos y del cuidado del medio ambiente.

La necesidad de nuevos puntos de conexión para la carga de las baterías de los equipos portátiles dentro de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital, si bien no es una obligación de la Universidad, si es claro que mejora el desempeño académico de su comunidad. Esto ha motivado el interés por innovar y apropiar tecnología para la implementación de prototipos novedosos para el suministro de energía que no dependan de la red local. Actualmente, la Facultad Tecnológica no cuenta con este tipo de sistemas, a pesar las investigaciones realizadas.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Denominación			Potencia [Kw]	Utilización
Baja	Muy baja	Microaerogeneradores	<1	Embarcaciones, sistema de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
		Miniaerogeneradores	1 - 10.	Granjas, viviendas aisladas(Sistemas Eólicos-Fotovoltaicos, bombeo,etc.
			10 -100.	Comunidades de vecinos, PYMES (sistemas mixtos EODisel, drenaje, tratamiento de aguas, etc.
Media			100 -1000.	Parques eólicos (Terreno complejo)
Alta			1000 - 10000.	Parques eólicos (Terreno llano, mar adentro)
Muy alta			>10000.	En fase de investigación y desarrollo, requiere nuevos diseños y materiales no convencionales. No antes del año 2010.

Tabla 1
Clasificación de aerogeneradores para producción de energía eléctrica vs. Potencia eléctrica (Hernández, 2010).

Metodología

En la actualidad se puede encontrar muchos fabricantes de equipos portátiles, por ejemplo de la laptop, y sin embargo, no existen estándares industriales para las fuentes de alimentación, al hablar de la energía necesaria para tener las baterías cargadas de los equipos portátiles.

Unos dispositivos móviles pueden trabajar a diferentes niveles de tensión que otros, sin mencionar la corriente necesaria para cargas sus baterías, en consecuencia, se toma la decisión de dejar la salida del sistema flexible de forma convencional de tomacorriente, de esta manera, los usuarios puedan acceder a la energía con sus respectivos adaptadores, los cuales vienen con los dispositivo móviles como el caso de los smartphone.

TURBINA:

Para empezar con un modelo de generación de energía eléctrica es necesario hacer una investigación acerca de cuánta es la potencia de suministro para la carga. En este caso, la potencia necesaria para cargar las baterías de los equipos portátiles.

Dado que la potencia activa para las baterías es:

$$P_d = V * I. \tag{1}$$

- P_d :Potencia de diseño en vatios [W].
- V: Tensión de salida especificada en los adaptadores en [V].
- I: Corriente nominal del adaptador en [A] o [mA].

Sin embargo, esta potencia varía en el día, de acuerdo con las tareas asignadas o el estado de la máquina.

En la tabla 2 se puede observar diferente valores de potencia para algunos tipos de notebooks de acuerdo al estado de la máquina, si está apagada y conectada, en uso máximo, en uso moderado, en estado suspendido o al cargar la batería. Por esta razón se escoge la potencia máxima de esta tabla como potencia requerida P_R para dimensionar el generador y la turbina eólica.

Con esta información y cálculo, se llega en conclusión que la batería de un computador portátil puede variar de 30 - 80 [W] (PENN, s.f.) , se adoptó el valor de 80W para el modelo del sistema de alimentación.

Sin embargo, el perfil del generador en dimensiones longitudinales debe ser relativamente pequeño para su implementación, para ello se llega a un acuerdo de 10W como potencia del generador P_g y, posteriormente, con la ayuda del banco de baterías llegar a la potencia requerida.

Para que la potencia necesaria sea acumulada, se elige un banco de baterías con una potencia superior o igual a la potencia de diseño P_d.

Para la turbina, se puede decir que la ecuación de la potencia de viento está dada por (Neumann, 2002):

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A^2 * V^3 \tag{2}$$

Donde:

- P: Potencia [W]
- A: Área del aerogenerador en contacto con el viento [m^2]
- ρ: Densidad del aire [kg/m^3]
- V: Velocidad del viento [m/s]

De la ecuación 2, se puede inferir que la variable con mayor peso es la velocidad del viento V. Además, éste es valor versátil en todo el día.

La densidad del aire es constante de un valor de $1kg/m^3$ para un sitio como Bogotá y la velocidad está entre $3[m/s]$ (Aguilar, Arias, Guasca, y Lamus, 2010) como promedio.

Notebook aproximada / Netbook de consumo de energía en vatios						
Modelo	Especificaciones básicas	Off (enchufado)	Boot (pico)	El uso moderado (rango)	Dormir	La carga de la batería (encendido)
Apple MacBook Pro De 13 pulgadas "Retina" (Mediados comprado 2012)	2,5 GHz Core i5, 8,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, OS X 10.8.3 (sucio)	1	50	49-53	1	53
Apple MacBook Pro 13 pulgadas (Mediados comprado 2009)	2.53 GHz Core 2 Duo, 4,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, Mac OS 10.5.8 (sucio)	1	52	58-60	1	56-60
Dell XPS 12 12,5 pulgadas (Comprado a finales de 2012)	2.6 GHz Core i5, 8,0 GB de RAM, 256 GB unidad de estado sólido, Windows 8 Pro de 64 bits (sucio)	1	21	38-40 *	1	66-71
Dell Latitude E4200 12 pulgadas (Comprado a finales de 2008)	1,4 GHz Core 2 Duo, 3,0 GB de RAM, 128 GB unidad de estado sólido, Windows Vista Business de 64 bits (sucio)	1	48	38-40	1	66-71 *
Dell Latitude XT2 XFR 12 pulgadas (Probado a principios de 2010)	1,6 GHz Core 2 Duo, 2,0 GB de RAM, 64 GB de disco de estado sólido, Windows Vista Business de 32 bits (limpia)	1	37	28-32	1	49
Dell Inspiron Mini 10 10 pulgadas (Comprado a finales de 2009)	1,6 GHz Atom, 1,0 GB de RAM, 160 GB de disco duro, Windows 7 Ultimate de 32 bits RTM (limpia)	1	21	19-21	1	34-35
Lenovo ThinkPad X100e 11,6 pulgadas (Probado a principios de 2010)	1.6 GHz Athlon, 3,0 GB de RAM, 250 GB de disco duro, Windows 7 Professional de 32 bits RTM (limpia)	1	21	19-21	1	68-70

Tabla 2
Consumo de potencia en Vatios(PENN, s.f.)

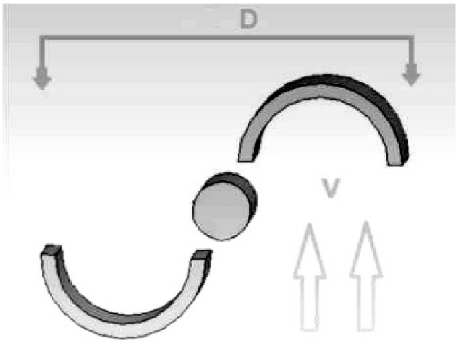


Figura 2. Modelo de turbina Savonius.

Ésta no es la única información necesaria para la construcción de la turbina, existe unos acoplamientos (uniones), características en que la energía mecánica se convierta en energía eléctrica, las cuales se llamará eficiencias.

La primera de ellas existe en el modelo de la turbina $\in_1$:, una pérdida de potencia mécanica que se llama eficiencia. Para esto, se consulta la Tabla 3 donde describe las eficiencias correspondiente a los tipos de construcción para algunos modelos de turbinas eólicas. Como perfil de la turbina un modelo apropiado, concorde con la construcción, sería un turbina tipo Savonius con una eficiencia de 20 % o 0,2 en por unidad (p.u.).

Las ventajas que presenta un generador de tipo Savonius son (Murillo, 2012):

- Su rotor es de eje vertical, por esto, no necesita disponer de un mecanismo de orientación.
- Acepta mucho mejor los vientos turbulentos que las turbinas que funcionan por sustentación.
- Se frena automáticamente al llegar a cierta velocidad límite.

La segunda eficiencia se encuentra en la unión que hay entre la turbina y el eje del generador $\in_2$:. Siendo optimistas

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

MÁQUINAS EÓLICAS	EFICIENCIAS EN %	
	Construcción simplificada.	Diseño óptimo.
Bomba de agua multipala.	10	30
Bomba de agua de palas de tela.	10	25
Bomba de agua Darrieux.	15	30
Aeromotor Savonius.	10	20
Prototipos de aeromotores pequeños de menos de 2 kw.	20	30
Prototipos de aeromotores medianos de 2 a 10 kw.	20	30
Prototipos grandes de más 10 kw.	---	30 a 40
Generador eólico Darrieux.	15	35

Tabla 3

Clasificación de aerogeneradores para producción de energía eléctrica vs. Potencia eléctrica.(LLanos, 2010)

y como no se usa un multiplicador (caja de engranajes para aumentar el torque y disminuir la velocidad, o viceversa) se puede decir que la eficiencia es de 100 %, no existe una pérdida por ensamble.

Acoplamiento directo de las partes móviles del generador con el eje de las aspas, evita el uso de una caja multiplicadora de revoluciones. Estas cajas multiplicadoras agregan vibraciones, ruido y fatiga al sistema de generación, además de requerir lubricación y mantenimiento (Rosenmann y López, 2007).

Y por último, se halla una eficiencia en la máquina, o sea, el generador. Una pérdida en la forma de construcción y las partes en que forma el generador (la resistencia R y la bobina L) $\in_3$:, esto no se puede ser tan optimista, las eficiencias están entre el 70 % al 80 % (Hernández, 2010) para los generadores.

Para abarcar lo anterior, se puede decir que la eficiencia total es:

$$\in_T = \in_1 * \in_2 * \in_3 \tag{3}$$

Donde:

- $\in_T$: Eficiencia total.
- $\in_1$: Eficiencia de la turbina.
- $\in_2$: Eficiencia del acople eje.
- $\in_3$: Eficiencia del generador.

De esta manera, se puede calcular la potencia de la turbina con respecto a la potencia de diseño y la eficiencia total.

$$P_t = \frac{P_d}{\in_T} \tag{4}$$

Donde:

- P_t: Potencia de la turbina [W].
- P_d: Eficiencia de la turbina [W].
- $\in_T$: Eficiencia total del aerogenerador.

Con el valor de la potencia de la turbina se calcula el área barrida separando de la fórmula 2:

$$A = \frac{2 * P_t}{V^3 * \rho} \tag{5}$$

Donde:

- P_t: Potencia de la turbina [W]
- A: Área del aerogenerador en contacto con el viento [m^2].
- ρ: Densidad del aire [kg/m^3].
- V: Velocidad del viento en [m/s].

Existen dos tipos de turbinas dependiendo de la orientación del eje (Siza, s.f.):

Eje horizontal: Son las turbinas más conocidas y se les denomina ”HAWTs” horizontal axis wind turbines. Los aerogeneradores de eje horizontal son los que han tenido más aplicación industrial a lo largo de la historia. La mayoría de los aerogeneradores instalados en el mundo para producción de energía en grandes cantidades son de eje horizontal y velocidad fija.

Eje vertical. La característica de esta clase de turbina es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo, son también llamados ”VAWTs” vertical axis wind turbines.

Entre este tipo existe:

- Darrieus el cual consiste en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.
- Panemonas tiene cuatro o más semicírculos unidos al eje central, su rendimiento es bajo.
- Savonius consiste en dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.

Las tecnológicas aplicadas sobre los aerogeneradores de eje horizontal, y las consecuentes mejoras en las prestaciones técnicas y económicas de estas máquinas, dejaron en segundo plano el desarrollo de los aerogeneradores de eje vertical. Sin embargo, a pequeña y mediana escala, para consumos independientes de la red eléctrica *stand − alone* se usa de eje vertical.

Para el modelo de la turbina tipo Savonius el área barrida es el área abarcada por las alabes como se ve en la figura2. Por lo tanto, el diámetro de la turbina sería:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \tag{6}$$

Donde:

- D: Diámetro de la turbina [m].
- A: Área del aerogenerador en contacto con el viento [m^2]

Además, se puede determinar el diámetro de la turbina con la potencia máxima:

$$P_{max} = 0{,}15 * D^2 * V^3 \tag{7}$$

Donde:

- P_{max}: Potencia máxima obtenida por la turbina [W].
- D: Diámetro de la turbina [m].
- V: Velocidad del viento [m/s]

Y nuevamente despejando el diámetro de la ecuación 7, se obtendría:

$$D = \sqrt{\frac{P_{max}}{0{,}15 * V^3}} \tag{8}$$

GENERADOR:

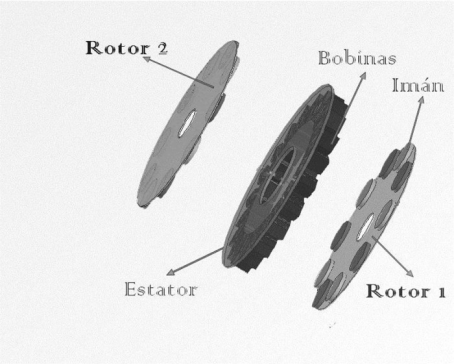


Figura 3. Modelo Generador de Imanes Permanentes.

En la Fig. 3 expone un modelo de generador de imanes permanentes, los cuales están distribuidos sobre dos rotores y un embobinado en el estator. De esta manera, se tiene el campo y el inducido.

El modelo de generador eléctrico es basado en las siguientes ecuaciones (Chapman, 2000):

$$e = K * W_m * \Phi \tag{9}$$

Donde:

- e:Tensión generada [V].
- K:constante de la máquina.
- W_m: Velocidad del rotor [rad/s].
- Φ: Flujo de campo magnético [Wb].

El generador es un alternador de imanes permanentes, ya que, estos son modelos para necesidades de baja potencia con condiciones de operación a bajas rpm (Berdugo y Pérez, 2011).

Existen dos tipos de generadores eléctricos a partir de la dirección del flujo: de flujo radial y de flujo axial, este último es, normalmente, utilizado para aplicaciones de altas potencias (Castillo y Iguarán, 2014).

Por su sencillez de construcción y desarrollo de materias primas el alternador de flujo axial es el más usado en aerogeneradores actualmente (Murillo, 2012).

Los rotores, con los imanes que los componen, actúan como ventiladores, así enfriando los enrollados de estator (Rosenmann y López, 2007).

El flujo de campo magnético es proporcionado por un grupo de imanes permanentes tipo moneda. Si el flujo de campo magnético es:

$$\Phi = B * A \tag{10}$$

Donde:

- Φ: Flujo de campo magnético [Wb].
- B: Densidad de campo magnético [Teslas].
- A: Área transversal del imán [m^2].

Entonces, se puede deducir de la ecuación 10 que entre mayor se el área A de las caras de los imanes, habrá mayor flujo magnético Φ.

Figura 4. Imán tipo moneda

Para especificar el tipo de imán, el cual fue usado en la construcción del prototipo, la tabla 4 resume algunas de la características del imán

La densidad de campo B en un imán se distribuiría de forma uniforme por toda la cara del imán como se expone en la Fig. 5 . La flechas corresponden al sentido del flujo en la cara del imán.

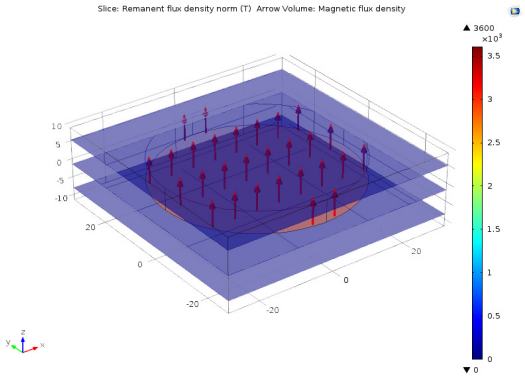


Figura 5. Simulación del flujo magnético del imán.

Tanto los imanes de samario-cobalto como los de neodimio-hierro-boro presentan diversos grados comerciales que les permiten adaptarse a distintas condiciones de utilización (Muñoz, 2008) .

Para la constante de la máquina, el modelo se guía de un generador de flujo axial de polos lisos. De esta manera con un número fijo de imanes, 12 imanes por estator, faltaría calcular el número de bobinas y el número de vueltas por bobina.

En general la constante de la máquina se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{Z * P}{2 * \pi * a} \tag{11}$$

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Imanes	
Material	Neodimio (NdFeB)
Dimensiones	50mm de diámetro x 6mm de grueso
Color	Gris Claro
Densidad de campo magnético	3600 Gauss

Tabla 4
Características del imán.

Donde:
- K: Constante de la máquina.
- Z: Número de vueltas.
- P: Número de polos.
- a: Trayectorias paralelas.

Además,

$$Z = 2 * C * N_c \tag{12}$$

Donde:
- Z: Número total de espiras.
- C: Número de bobinas.
- N_c: Numero de vueltas por bobina.

Entonces, con la información de las ecuaciones 11 y 12, se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Entre mayor número de imanes, se tendrá mayor tensión eléctrica.

2. El número de trayectorias paralelas debe ser el menor posible.

3. El número de bobinas es correspondiente al área del estator.

4. Entre mayor número de vueltas en las bobinas, el número de bobinas es menor.

5. Debe haber el menor salto vacío de aire entre los imanes y las bobinas, un número considerable de bobinas y de imanes (Chumioque, s.f.).

Si se analiza la forma física de las bobinas, al hablar lo largo de éstas, se puede decir que la ley de Lorenz para un conductor que sigue una trayectoria circular (Murillo, 2012) sería:

$$e = \frac{1}{2} * W_m * B * L * (R_1 + R_2). \tag{13}$$

Donde:
- e: Fuerza electromotriz inducida [V]
- W_m:Velocidad angular del rotor [rad/s]
- B: Densidad de campo magnético [T].
- L: Longitud de la bobina [m].
- R_1: Distancia del centro a la cabeza de la bobina [m].
- R_2: Distancia del centro a la base de la bobina [m].

Con la Fig. 6, aclara algunas de las variables de la ecuación 13. Sobretodo, las distancias R_1 y R_2 en la bobina.

De la ecuación 13, se puede deducir que entre mayor sea el largo de las bobinas habrá más tensión eléctrica en sus terminales, siempre y cuando, las bobinas estén dentro del campo magnético.

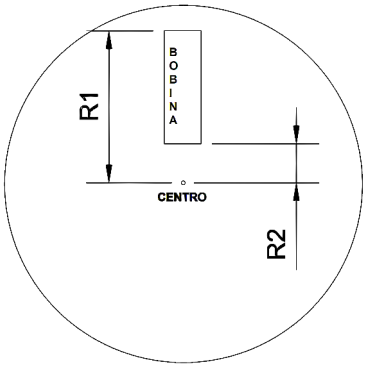


Figura 6. Explicación de la Ley de Lorenz

De las anteriores ecuaciones 9 y 13, existe una variable importante durante los cálculos de tensión eléctrica, la velocidad angular mecánica o velocidad del rotor w_m.

Esta velocidad angular es directamente proporcional con la velocidad del viento, si se dice que a mayor velocidad del viento habrá mayor velocidad angular mecánica.

No obstante, para términos de un generador es mejor hablar de las unidades rpm (revoluciones por minuto, N_m) en vez de referirnos a m/s o km/h.

$$N_m = \frac{TSR * V * 60}{(R * 2 * \pi)}. \tag{14}$$

Donde:
- N_m: Velocidad angular mecánica [rpm].
- TSR:Relación especifica o periférica.
- V: Velocidad del viento [m/s].
- R: Radio [m].

TSR, de las siglas en inglés Tip-Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica (LLanos, 2010).

En la Fig. 7 , se observa el rendimiento o la eficiencia de cada modelo de turbina con respecto al TSR. La eficiencia ideal está en un valor de 0,59 p.u.

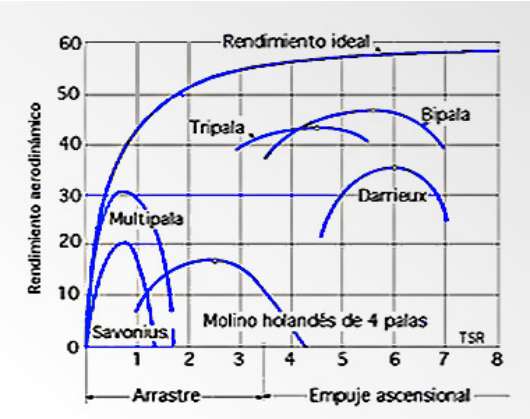


Figura 7. Curva de límite de Betz para diferentes tipos de aerogeneradores (LLanos, 2010).

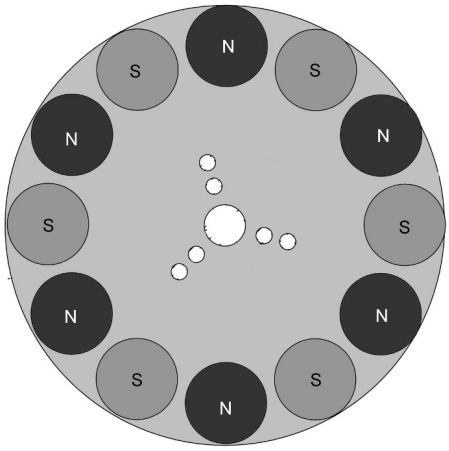


Figura 8. Distribución de los imanes de Neodimio en los rotores.

Para que exista un flujo variable en el tiempo de acuerdo con la Ley de Faraday 15 , se distribuye los imanes en el rotor como muestra las Figs. 8 y 9 . Las letra describen qué tipo de polo se encuentra de frente (N Norte y S Sur), de esta manera la señal de tensión eléctrica es de forma alterna.

En la tabla 5 , aclara las dimensiones y las características del rotor.

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \tag{15}$$

Donde:

- Φ: Flujo de campo magnético [Wb].
- e: FEM inducida [V].

Además, de acuerdo a un número de imanes y una velocidad mecánica, la frecuencia eléctrica de la señal de tensión sería (Chapman, 2000) :

$$f_e = \frac{P}{120} * N_m \tag{16}$$

Donde:

- f_e: frecuencia eléctrica [Hz].
- P: Número de Polos.
- N_m: Velocidad mecánica [rpm].

Rotor	
Material	Hierro
Dimensiones	27cm diametro x 0.2 cm grueso
Color	Gris Oscuro
Número de imanes	12

Tabla 5
Características del Rotor.

Para que el flujo magnético vaya de un rotor a otro, en la Fig. 9 expone cómo se colocan las caras de los imanes los cuales son de igual tamaño, con los polos alternados y equidistantes entre sí.

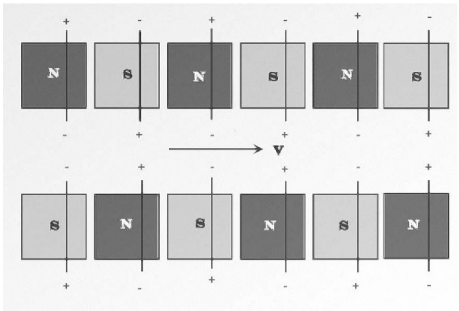


Figura 9. Distribución caras de los imanes de Neodimio (Navasquillo, s.f.).

De esta manera, el flujo magnético corre por el disco que tiene los imanes, así se vuelve un circuito magnético. En la Fig. 10 muestra cómo el flujo magnético está distribuido en el rotor por medio de lineas y las flechas indican la dirección de éste.

El estator está conformado por las bobinas distribuidas alrededor de una placa de acrílico. En la Fig. 11 muestra la forma física de las bobinas en el estator.

Las bobinas deben ser unidas para que una sola corriente circule a través de ellas. De esta manera, la Fig. 12 expone la interconexión de las bobinas y el sentido de la corriente eléctrica para un sentido del giro del eje.

Para especificar el estator, la tabla 6 resume las características del embobinado y el material del estator.

Si se deja el mismo número de bobinas que número de polos, a cada bobina le correspondería un flujo de campo magnético como la suma de los flujos de los dos imanes. En la Fig. 13 expone como los imanes inducen a las bobinas un

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Estator	
Material	Acrílico
Dimensiones	32 cm diámetro x 0.5 cm de grueso
Color	Transparente
Peso	1.71 kg
Material de las bobinas	cobre
Dimensiones bobina	20 x 75 x 20 mm
Peso de bobina	0.15 kg
Número de bobinas	12
Número de vueltas por bobina	188
Peso total de bobinas	1.85 kg
Peso total	3.54 kg

Tabla 6
Características del Estator.

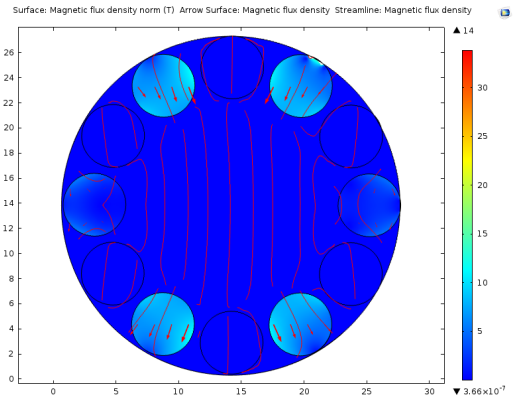


Figura 10. Simulación de la interacción de flujo magnético dentro del rotor.

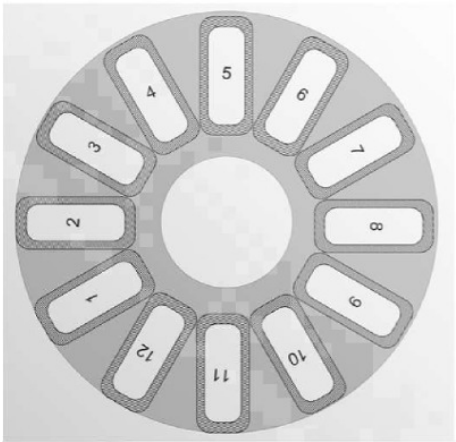


Figura 11. Distribución Bobinas en el Estator.

flujo magnético, el cual cambia al hacer gira el eje. Las lineas indican la dirección del flujo en cada imán en los rotores.

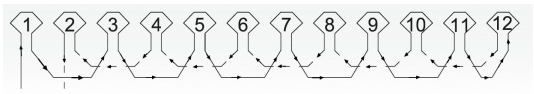


Figura 12. Interconexión de las bobinas.

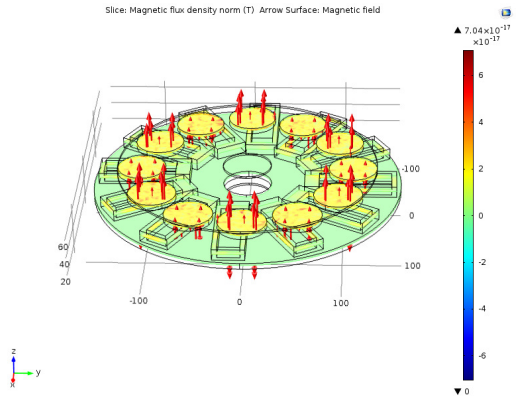


Figura 13. Simulación bobinas dentro del campo magnético.

De esta manera, para cada valor de velocidad de viento se hallará un valor de tensión, rpm, potencia generada y potencia en la turbina.

V [m/s]	P_t [W]	P_g [W]	R.P.M	Tension[V]	Corriente[mA]
0,5	0,29	0,05	3,14	2,00	23,15
1	2,31	0,37	6,28	4,00	92,59
1,5	7,81	1,25	9,41	6,00	208,33
2	18,52	2,96	12,55	8,00	370,37
2,5	36,17	5,79	15,69	10,00	578,70
3	62,50	10,00	18,83	12,00	833,33
3,5	99,25	15,88	21,97	14,00	1134,26

Tabla 7
Valores de variables eléctricas en el prototipo del aerogenerador.

La tabla 7 ayuda a visualizar los valores de potencia y tensión eléctrica para diferentes valores de velocidad de viento. ⋆ La corriente eléctrica es un valor máximo cuando en las terminales del generador presente la tensión especificada.

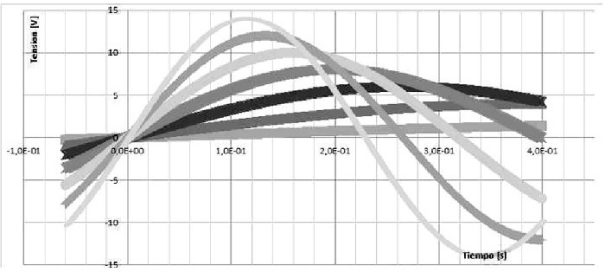


Figura 14. Señales de tensión esperadas a diferentes velocidades del viento.

En Fig. 14 se muestra la diferencia de las señales de tensión en cada una de las velocidades del viento. Se puede apreciar un cambio de la frecuencia eléctrica [Hz] y el valor de la tensión eléctrica [V] a cada una de las velocidades del viento [m/s].

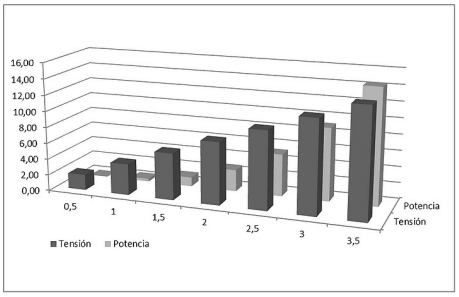


Figura 15. Potencia generada y tensión eléctrica Vs.Velocidad del viento.

Para poder analizar los valores potencia y tensión a diferentes valores de velocidad del viento, la Fig. 15 ofrece valores tensión y potencia generada por la maquina sincrónica.

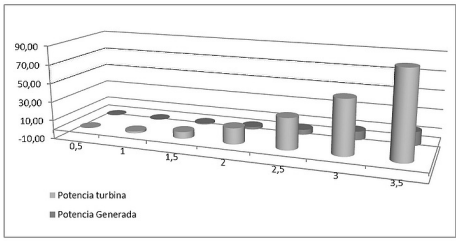


Figura 16. Potencia en la turbina y Potencia generada vs. Velocidad del viento.

Las potencias del sistema, tanto la potencia de la turbina P_t como la potencia generada P_g, son diferentes a cada valor de velocidad del viento como se puede apreciar en la Fig. 16.

En la Fig. 17 se exponen las características eléctricas del estator como un circuito eléctrico. Se muestran dos elementos los cuales R y L son la resistencia eléctrica del conductor y L la inductancia formada por el arrollamiento del conductor (Bobina) respectivamente.

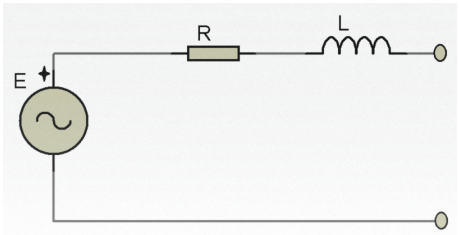


Figura 17. Circuito equivalente en el Estator.

Para hallar el valor de R manera teórica, al tener en cuenta la longitud del conductor y una resistividad aparente propia de cada tipo de alambre, se usaría las siguientes ecuaciones:

$$r = \rho_a * l \tag{17}$$

Donde:

- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].
- ρ_a: Resistividad Aparente del conductor [Ω/m].
- l: Longitud del alambre [m].

$$L = \frac{N^2 * \mu_0 * A}{l} \tag{18}$$

Donde:

- L: Inductancia de los devanados [H].
- N: Número de vueltas.
- μ_0: Permeabilidad magnética del vacío. 4 x $10^{-}7$ $\frac{H}{m}$
- A: Área por la que atraviesa el flujo [m^2].
- l: Longitud que recorre el flujo [m].

RECTIFICADOR:

La rectificación de tensiones y corrientes CA se realiza por medio de diodos (Mohan, 2009). El voltaje de CC de salida de un rectificador debe estar tan libre de ondulaciones o rizos como sea posible. Por tanto, se conecta un condensador grande como filtro del lado DC.

En la Fig. 19 se expone dos señales de tensión eléctrica, la señal de forma sinusoidal sería la señal de entrada del rectificador a una frecuencia 60 Hz a 12V de amplitud. La señal continua representa la salida del rectificador, se posible apreciar la disminución de la tensión eléctrica al paso de una señal a otra, la tensión es aproximadamente de 11.1V.

En la tabla 8 resume algunas características del prototipo de rectificador utilizado para el proyecto.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Figura 18. Prototipo del rectificador de onda completa.

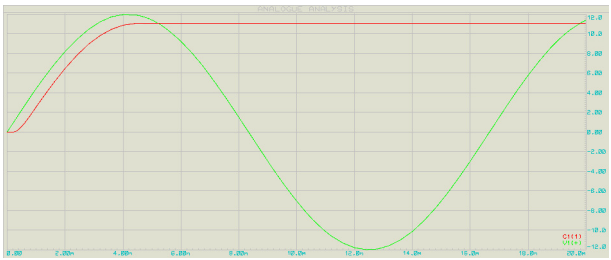


Figura 19. Señal esperada por el rectificador de onda completa.

Rectificador	
Tensión entrada AC Max.	24V
Tensión de Salida DC	24V
Corriente Max.	1A

Tabla 8
Características del Rectificador.

CONVERTIDOR DC/AC:

Ya que se genera a una potencia diferente a la potencia de salida del sistema. Se acopla un dispositivo, convertidor DC/AC, después del regulador de carga donde se encuentra el banco de baterías para ofrecer la energía acumulada a 120V a 60Hz.

El convertidor de energía es un sistema electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferente. Esto incluye aspectos como eficiencia, reversibilidad, grado de idealidad y fiabilidad.

Los convertidores DC/AC reciben también el nombre de inversores, realizan la conversión de corriente continua a corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida, y su forma de onda (Mañana, 2002) .

Convertidor DC/AC	
Potencia	100W
Tensión de entrada DC	12V
Tensión de salida AC	120V
Tensión de salida USB	5V
Corriente de salida	1A

Tabla 9
Características del Convertidor DC/AC.

REGULADOR DE CARGA:

Este dispositivo electrónico evita sobrecargas o descargas excesivas a la batería, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Además debe asegurar que el sistema siempre trabaje en el punto de máxima potencia, o lo más cerca posible (Forget, s.f.) .

La función principal de este componente es controlar el estado de carga de la batería, asegurando así la vida útil de la misma:

- Controla el nivel de carga y descarga de la batería.
- Evita la sobrecarga de la batería, impidiendo la entregada de corriente desde la alimentación cuando ya está cargada. Esto también asegura que el voltaje de la batería no esté mayor a lo permitido en los equipos conectados.
- Evita la descarga profunda de la batería, cortando la entrega de corriente a las cargas de consumo cuando la batería ya alcanzó el límite bajo de voltaje.

Regulador de Carga	
Tension nominal	12V
Modo de carga	PWM
Tensión de apertura desde entrada	17.4V
Tensión de desconexión de batería	10.7V
Tensión de salida USB	5V
Tensión de reconexión de la batería	12.6V

Tabla 10
Características del Regulador de Carga.

Vale aclarar que los valores de la tabla 10 pueden ser modificados, de acuerdo con las características de la batería 11. Para este modelo se usa VS4024U.

BATERIAS:

Básicamente, la energía de una batería se genera a partir una reacción química (Lagos, s.f.) donde es hace una doble conversión de energía. La primera conversión, energía eléctrica en energía química, toma lugar durante el proceso de carga. La segunda, energía química en eléctrica, ocurre cuando la batería es descargada. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo se necesitan dos electrodos metálicos

inmersos en un medio que los vincule, llamado electrolito (Rodríguez, s.f.) .

Batería	
Tension nominal	12V
Capacidad nominal (Tasa de 20 horas)	7Ah
Resistencia interna (Carga completa)	19mΩ
Máxima descarga de corriente	105A por 5s
Máxima corriente de carga	1.4V

Tabla 11
Características de la Batería.

Una de las manera de representar un modo de cargar una batería, al considerar el manual de la batería HGL7-12, es el algoritmo de tres etapas, en la Fig. 20 representa las tres etapas en que la batería comienza a cargar hasta que ésta totalmente cargada.

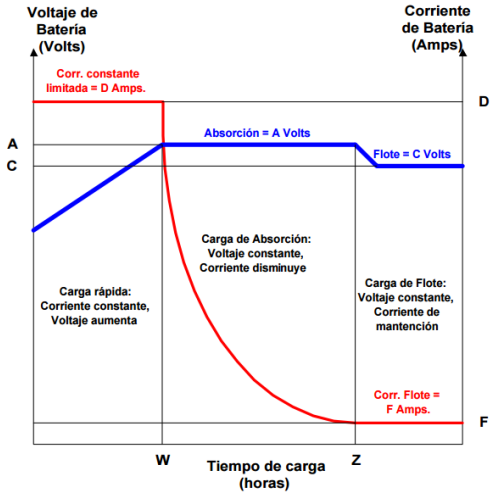


Figura 20. Algoritmo de tres etapas (Lagos, s.f.) .

En el caso de la tensión, el valor de la tensión A es una constante para el cargador durante la etapa de absorción y C es valor de tensión constante durante la etapa de almacenamiento.

Para la corriente, D es el limite de corriente eléctrica regulada o la corriente que el cargador mantiene constante duran la etapa de carga principal. El valor de F es una corriente en la etapa de almacenamiento.

Finalmente, para el valor de tiempo W es el tiempo de carga principal. Z es el tiempo total transcurrido en la etapa de carga principal y la etapa de absorción. Se puede inferir que la duración de la etapa sería numéricamente igual a la diferencia entre Z y W. El tiempo de la etapa de almacenamiento sería indefinida.

Evaluación de desempeño

Para obtener un valor aproximado de las pérdidas eléctricas, se hace una prueba de laboratorio. Esta prueba consiste en hallar la resistencia eléctrica de los devanados, por medio de una excitación externa con una fuente eléctrica DC. Para encontrar la pérdidas por calor en esta clase de generadores eléctricos, la ecuación es la siguiente:

$$P_e = I^2 * r \tag{19}$$

Donde:

- P_e: Pérdidas eléctricas [W]
- I: Corriente eléctrica que circula por los devanados [A]
- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].

En la Fig. 21 expone el esquema de conexión de los multímetros con una fuente externa de corriente DC, el instrumento que tiene la palabra volt es el voltímetro y amp es el amperímetro. Para este caso se usaron los Multímetro True RMs Fluke 179 y Fuente Extech 382-210.

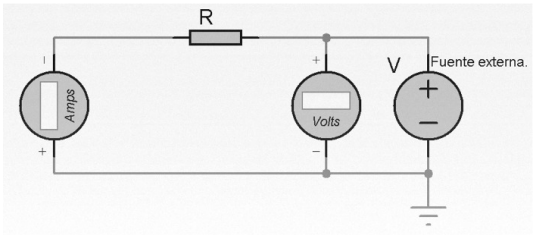


Figura 21. Esquema de medición de la resistencia en DC.

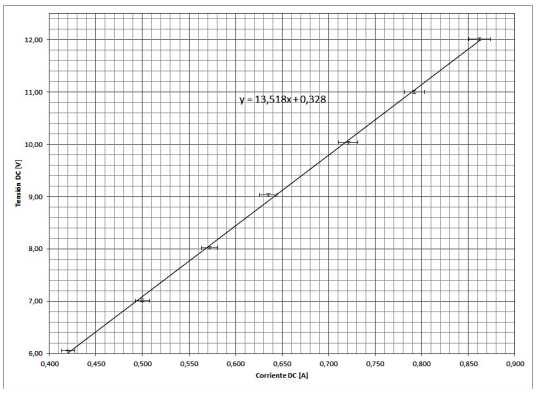


Figura 22. Valores de la medición de la resistencia en DC.

En la Fig. 22, se observa una gráfica conformada por una serie de puntos en la cual la tensión y corriente eléctrica se enfrentan, con la ayuda de la Ley de Ohm, se puede obtener la resistencia de los devanados, de la misma manera, al dibujar una línea de tendencia se puede hallar un valor aproximado de la resistencia.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Vale aclarar que la parte inductiva "L" no se analiza dentro del circuito, porque a la frecuencia de 0 Hz, su valor es nulo. (Ver la ecuación 22

$$V = I * r \tag{20}$$

Donde:

- V: Tensión de suministro [V]
- I: Corriente eléctrica medida [A]
- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].

Entonces, la pendiente de la gráfica tensión vs. corriente eléctrica, se obtendría la resistencia eléctrica de los devanados.

Adicionalmente a esta prueba, se hace una prueba en corriente alterna para hallar la parte reactiva, es decir, L. Sin embargo, se debe hallar un valor previo, el cual es la Impedancia.

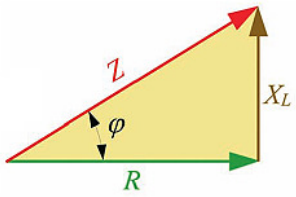


Figura 23. Triángulo de impedancias (Miguel, 2014) .

$$Z^2 = r^2 + x_l^2 \tag{21}$$

Donde:

- Z:Impedancia [Ω].
- r: Resistencia eléctrica de los devanados [Ω].
- x_l: Reactancia los devanados [Ω].

De la misma manera que la resistencia fue medida, la impedancia se mide con una fuente externa de corriente alterna a un frecuencia eléctrica de 60 Hz, se usó los mismo instrumentos de medida que la anterior medición 21 .

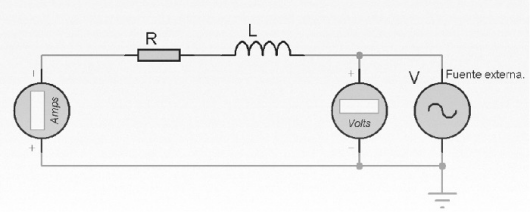


Figura 24. Esquema de medición de la impedancia.

Al hacer un símil con la resistencia en la ley de ohm, la impedancia se halla su magnitud con la relación de la magnitud de la Tensión sobre la magnitud de corriente eléctrica.

Despejando de la ecuación 21 en valor de x_l, se tendría el valor de la reactancia para un valor de frecuencia

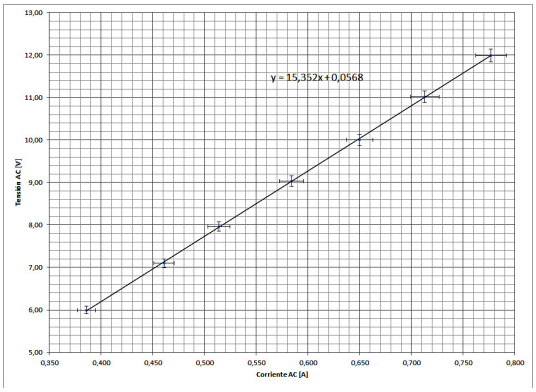


Figura 25. Valores de la medición Impedancia.

determinada, si se desea saber el valor de L, se emplea la ecuación 22 :

$$x_l = 2 * \pi * f * L \tag{22}$$

Donde:

- x_l: Reactancia los devanados [Ω].
- f: Frecuencia en el momento de la medición [Hz].
- L: Inductancia de los devanados [H].

Para observar el comportamiento del rectificador al pasar una señal a 60 Hz, se hace una medición de tensión eléctrica tanto a la salida como la entrada del este dispositivo con un osciloscopio, el cual debería tener dos canales, este caso de uso el osciloscopio digital Rigol DS1102E.

En la Fig. 26 se expone dos señales: primera señal de forma sinusoidal, con 5V de división y como referencia la flecha con número 1, es la entrada al rectificador con una fuente variable AC. La segunda señal de forma constante en el tiempo, 5V de división y referenciada con la flecha con el número 2, es la salida del rectificador sin carga. La escala de tiempo está en milisegundos en divisiones de 5ms.

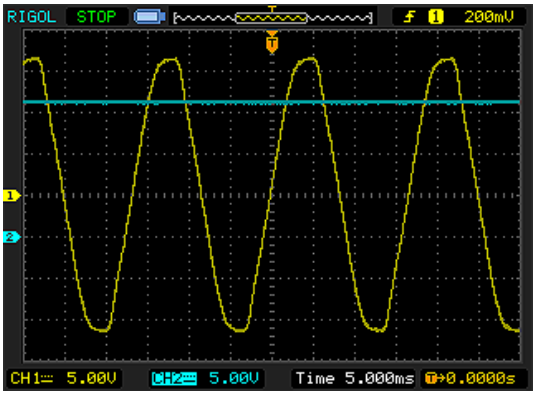


Figura 26. Señal de entrada y salida del Rectificador.

Una de las prueba eléctrica era reconocer el comportamiento del regulador de carga con una batería cargada y a su salida el convertidor DC/AC. En Fig. 27 muestra una señal de tensión eléctrica para la salida del sistema, dicho anteriormente, la sonda fue atenuada x10 para la visualización de las dos señales en un solo oscilograma. La prueba se hace sin carga.

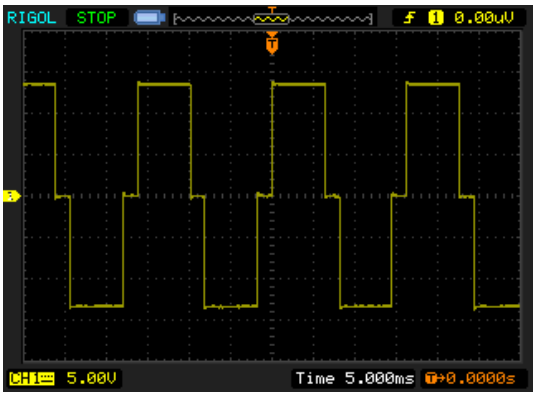


Figura 27. Señal de salida del Inversor y Regulador de carga.

Para contemplar algunos de los valores de la salida del sistema como la tensión máxima, mínima, rms, periodo, frecuencia eléctrica, entre otras. En la Fig. 12 resume la información de la medición.

Vmax= 13.8V	Vavg=-368mV	Rise=2.200ms
Vmin=-13.8V	Vrms= 12.1V	Fall=2.060ms
Vpp= 27.6V	Vovr=1.3%	+Wid=1.000ms
Vtop= 13.5V	Vpre=0.5%	-Wid=8.100ms
Vbas=-13.5V	Prd=18.00ms	+Duty=55.6%
Vamp= 27.0V	Freq=55.56Hz	-Duty=450.0%

Tabla 12
Valores de tensión para la salida del inversor.

En las Figs. 29, 28 y 30, se expone la señal del generador eléctrico a tres diferentes frecuencias [Hz] concorde a tres niveles de tensión [V]. De esta manera, la señal que se visualiza tiene forma sinusoidal en los tres casos.

En la siguiente gráfica 31 expone una medición del generador eléctrico al medir la magnitud de la tensión eléctrica a través de diferentes revoluciones por minuto visto del eje. Existe una variación proporcional de la tensión eléctrica con velocidad mecánica del eje, ya que el eje está conectado a un turbina tipo Savonius.

A medida que gire a mayor velocidad [rpm] el eje, la tensión aumenta. Vale aclarar que existe un punto de operación, donde los valores de tensión eléctrica más elevados (10 a 18 V) se encuentran en un rango de 110 a 210 rpm.

De la misma manera que cambia la tensión eléctrica, la frecuencia eléctrica varia de acuerdo con la velocidad del viento como se muestra en la Fig. 32, concorde con la ecuación 16 . La velocidad del viento [m/s] en el eje de las abscisas no presenta un valor constante en ninguno de sus intervalos, de esta manera, la frecuencia [Hz] en el eje de las ordenadas puede tener valores altos y bajos para los mismos valores de la velocidad del viento.

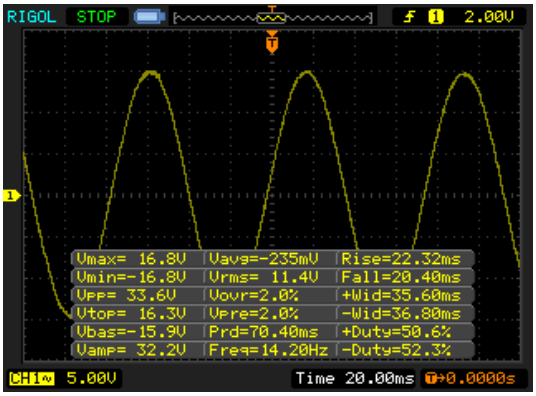


Figura 28. Señal del generador en vacío a 16.8 V pico.

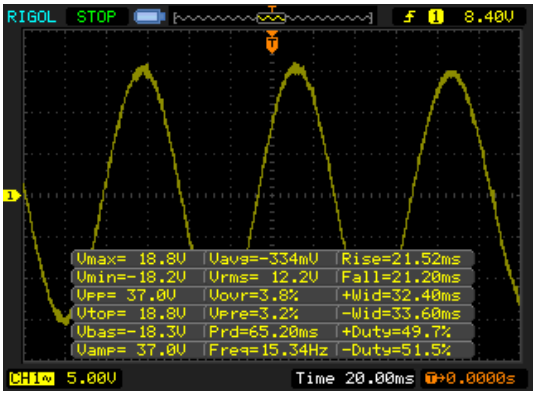


Figura 29. Señal del generador en vacío a 18.8 V pico.

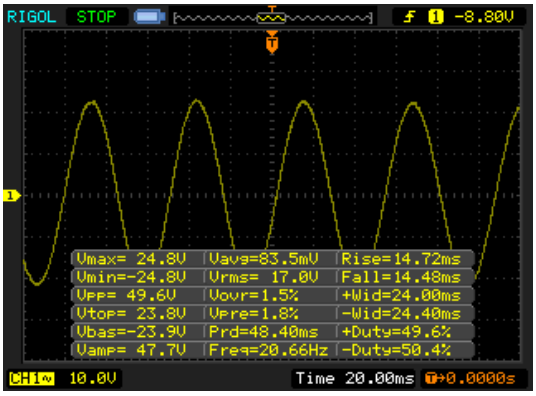


Figura 30. Señal del generador en vacío a 24.8 V pico.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

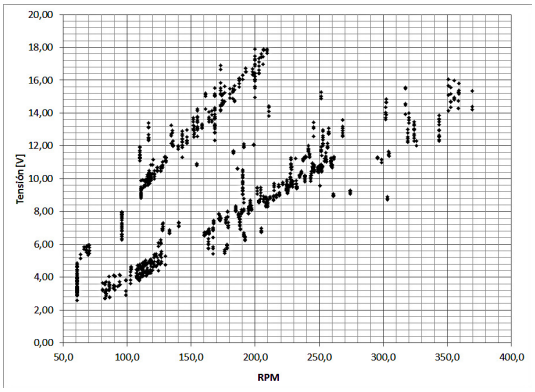


Figura 31. Gráfica de Tensión Vs. RPM

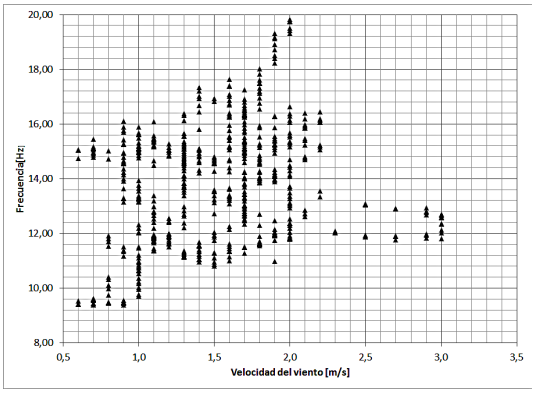


Figura 32. Gráfica de Velocidad del viento Vs. Frecuencia Eléctrica.

Conclusiones

• En esta investigación se enfatiza en un prototipo de generación eléctrica, el cual aprovecha la potencia mecánica que ofrece la viento para transformarla a potencia eléctrica. El prototipo opera a la condiciones dimensionadas, previas a la construcción, además, es posible alcanzar valores de tensión eléctrica superiores cuando la velocidad del viento incremente considerablemente. La construcción se realizo basado en modelos de alternadores de imanes permanentes, es decir, cuanto mayor sea el flujo magnético proporcionado por los imanes, el generador eléctrico podrá entregar en sus terminales mayor tensión eléctrica a menores velocidades. Durante las pruebas de desempeño se observó que los valores de velocidad mecánica [rpm], frecuencia[Hz] y tensión eléctrica [V], no eran concretos para un sólo valor de velocidad del viento [m/s], sin embargo, el prototipo cumplía con el objetivo de proporcionar energía eléctrica al banco de baterías, a través de los dispositivos electrónicos dimensionados para la transformación y regulación de la energía eléctrica.

• La energía eólica es un recurso útil visto desde cualquier valor de potencia, siempre y cuando sea dimensionado adecuadamente. Puede que sea difícil generar grandes cantidades de energía eléctrica con bajas velocidades de viento, sin embargo, pequeños prototipos de generación, distribución y regulación puede llegar a ser un grano de arena para contribuir con el cuidado del medio ambiente.

• Existen varios modelos de turbinas eólica entre las cuales cambian sus parámetros de diseño, esto de acuerdo con las características propias del lugar, es decir, la velocidad del viento o propiamente hablando del TSR y los lugares de disponibilidad en donde se puedan ubicar las turbinas eólicas. La facilidad de construir una turbina eólica comprende desde la forma física hasta costo monetario que se conlleva, de este orden de ideas, una turbina eólica puede disminuir su tamaño físico, si se apoya la potencia eléctrica con dispositivos electrónicos de potencia. El costo monetario puede elevarse por los elementos electrónicos adiciones a la generación, sin embargo ofrecen una disponibilidad de la energía eléctrica a mayor rango de tiempo.

• Algunos de los requisitos de la construcción de un generador de imanes permanentes, es propiamente la magnetización o flujo magnético de los imanes, el tamaño de estos, las dimensiones de los devanados y estructura física propia de la máquina (Carcaza). Todo esto lleva a cálculos, los cuales el constructor del prototipo debe investigar en gran número de documentos y unificar fórmulas que muestren una guía para el modelo a construir, con lo anterior, este documento pretende dar algunas indicaciones generales para un tipo de generador y así contribuir con futuros trabajos.

• Las pruebas realizadas en este documento fueron enfocadas en visualizar u obtener un valor en que todo funcionara de acuerdo a cálculos previamente hechos o estimaciones propias por los autores para el funcionamiento del prototipo, encontrar las especificaciones mínimas de la máquina y que la potencia fuera suficiente para su uso final. Para cada prueba fue necesario usar equipos de medición en lo cual es necesario enfatizar que la utilización de estos equipos implica una responsabilidad, para esto, el personal debe ser capacitado, tener idea de lo que desea hacer y desea visualizar.

Trabajo futuro

• Investigación precisa de los elementos electrónicos para el funcionamiento optimo del sistema.

• Formulación de modelos eléctricos y electrónicos diferentes al descrito en este articulo, para la comparación de eficiencia del sistema.

• Una investigación apropiada, más allá de beneficio costo en la parte monetaria, si no en el ámbito de impacto medio ambiental, es decir si estos modelos son realmente mitigadores del daño ambiental a futuro.

• Investigación de otras finalidades de la micro-generación, en lugares urbanos como la ciudad de Bogotá.

Reconocimientos

Jhon Edison Franco Gamba, por su participación del documento previo a éste, para generar una propuesta con un objetivo real. Profesor Fredy H. Martinez Sarmiento, por su colaboración en realización de este documento, al dar observaciones acertadas y constructivas en el proceso de desarrollo. También por proporcionar parte de los dispositivos en el prototipo. Al Grupo de Investigación de Energías Renovables de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su colaboración en el acceso a su turbina eólica para la investigación del generador eléctrico y comparar valores de teóricos del dimensionamiento de la turbina tipo Savonius. A las empresas que afectaron de manera directa e indirecta en la construcción de este prototipo, por su cumplimiento y responsabilidad. A mis jefes que los cuales me dieron una oportunidad de trabajo para financiar este proyecto, y también comprender mi retiro para la culminación de éste. A mi familia por la paciencia acumulada por varios años y respetar mis decisiones, las cuales tome para terminar mi carrera. A todos mis profesores que se tomaron el tiempo en formar personas, no sólo en la parte académica sino con una educación reflexiva en el cuidado de su entorno. Y sobre todo a Dios, que me dio fuerza para terminar este proyecto, guiándome en buen camino, aconsejándome cuando no tenia más ideas. Este trabajo es dedicado a Él.

Referencias

Aguilar, L., Arias, C., Guasca, A., y Lamus, M. (2010). Evaluación del potencial energetico del viento entre dos edificios de pequeña altura. En *6to taller internacional de energia y medio ambiente.*

Berdugo, O., y Pérez, J. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia.* (Universidad Industrial de Santander)

Castillo, C., y Iguarán, H. (2014). *Diseño y construcción de un generador de magnetos permanentes.* (Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniría Mécanica Bucaramanga)

Chapman, S. (2000). *Máquinas eléctricas.* Mc Graw Hill.

Chumioque, R. (s.f.). *Cómo construir un aerogenerador de 700 vatios.* Descargado de `http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-700w.pdf`

Forget, A. (s.f.). *Manual de diseños de sistemas fotovoltaicos ailados.* (2011)

Hernández, F. (2010). *Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia.* (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería Eléctrica.)

Lagos, P. (s.f.). *Conceptos básicos de carga de bbatería y algoritmo de carga.* (Sidei Ingeniers Ltda.)

LLanos, J. (2010). *Energía eólica, iv parámetro de diseño.* (2010)

Mañana, M. (2002). Regulación, control y protección de las máquinas eléctricas. *Universidad de Cantabria*, *1*, 9-10.

Miguel, P. A. S. (2014). *Electrotecnia*. Ediciones Paraninfo.

Mohan, T. . R. W., N. & Undeland. (2009). *Electrónica de potencia convertidores, aplicaciones y diseño* (P. E. R. Vázquez, Ed.). Mc Graw Hill.

Muñoz, R. L. (2008, Octubre). *Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización.* (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)

Murillo, J. (2012). *Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes.* (ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL)

Navasquillo, J. (s.f.). *Funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de lorenz.* Descargado de `http://www.uv.es/~nnavasqui/aero/Fungenper.pdf`

Neumann, A. L. (2002). *La energía eólica: Principios básicos y tecnología*. Departamento de ingeniería, Universidad Carlos III de Madrid.

PENN. (s.f.). *Computer power usage. penn information systems & computing.* Descargado de `https://secure.www.upenn.edu/computing/resources/category/hardware/article/computer-power-usage` (2013)

Rocabado, S., Díaz, J., y Cadena, C. (s.f.). *Cargadores solares portatiles para el uso de dispositivos moviles en zonas rurales aisladas del noa.* Descargado de `https://www.researchgate.net/publication/281849846_CARGADORES_SOLARES_PORTATILES_PARA_EL_USO_DE_DISPOSITIVOS_MOVILES_EN_ZONAS_RURALES_AISLADAS_DEL_NOA` (2015)

Rodríguez, G. (s.f.). *La batería de plomo-ácido.* Descargado de `http://www.academia.edu/8510517/CAPITULO_5_LA_BATERIA_DE_PLOMO-ACIDO` (Capítulo 5)

Rosenmann, P., y López, J. (2007). Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, Memoria (Ingeniería Civil Electricista)*, *1*, 1-129.

Siza, G. (s.f.). *Diseño, simulación y construcción de un prototipo de aerogenerador de eje horizontal.* (2009)

CC BY NC ND

Revista Tekhnê
Enero - Junio 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 57– 72
© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Especificación, diseño y montaje de un sistema de lavado por ultrasonido

Specification, design and assembly of a ultrasonic cleaning system

Wilmark A. Soto P.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
wilmark.soto0511@hotmail.com

Miguel A. Lara B.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
y.ngwie92@hotmail.com

Este artículo presenta el diseño, montaje y evaluación de un sistema de lavado por ultrasonido, exponiendo la construcción de cada etapa que compone el prototipo y especificando la selección de los componentes. El sistema se compone de varias etapas: rectificación AC/DC, convertidor DC/AC de alta frecuencia, transductor piezo eléctrico y el modelo del contenedor. En la parte final del desarrollo se realizó una evaluación del desempeño para cada una de las diferentes etapas del proceso con el objetivo de comprobar progresivamente que cada una de las etapas funciona de manera correcta. Al ir realizando las pruebas se generaron varios inconvenientes y fallos en el desempeño en varias de las etapas que progresivamente fueron solucionados a medida que la investigación avanzaba, llegando finalmente a un resultado cercano con lo diseñado y propuesto en el papel inicialmente.

Palabras clave: Convertidor de potencia, limpieza, transductor, ultrasonido

This paper presents the design, assembly and evaluation of an ultrasonic cleaning system, exposing the construction of each stage of the prototype and specifying the selection of components. The system consists of several stages: AC/DC rectification, DC/AC high frequency converter, piezo transducer, and the container model. In the final part of the development a performance evaluation was performed for each of the different stages of the process with the aim of progressively ensure that each stage works correctly. By going performing tests several drawbacks were generated and performance failures in several of the steps that were solved gradually as the investigation progressed, finally coming to a close result with designed and initially proposed.

Keywords: Cleaning, power converter, transducer, ultrasound

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016
Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756
Cómo citar: Soto, W. y Lara, M. (2016). *Especificación, diseño y montaje de un sistema de lavado por ultrasonido*. Revista Tekhnê, 13(1), 57-72.

Introducción

Una limpieza ineficaz es una problemática en varios aspectos de cualquier sociedad. Existen muchos casos famosos al respecto. Uno de ellos, es el caso en donde el gobierno de Estados Unidos fue demandado con éxito por parte de los veteranos que adquirieron infecciones al practicarse endoscopias de rutina, debido al aumento de estos exámenes, y del poco tiempo disponible para la limpieza de instrumentos entre cada uno de los procedimientos. Lo más probable es que estos casos incrementen en todo el mundo si las tecnologías de limpieza no mejoran, teniendo en cuenta especialmente la resistencia de algunos microorganismos y priones, como responsables de abundantes enfermedades.

La limpieza es de vital importancia en diferentes áreas claves, incluyendo las industrias del sector de la salud y de preparación de alimentos. Esto es así ya que en el mundo anualmente mueren miles de personas por falta de la limpieza necesaria y adecuada, o terminan lastimados por la misma tarea de limpiar los objetos sin alguna protección frente a elementos cortos punzantes o las distintas soluciones para el lavado de los mismos (Leighton, Birkin, y Offin, 2013).

El ultrasonido es una rama de la acústica que maneja señales en un rango de frecuencias por encima del límite audible por el ser humano. El término en sí se ha relacionado con los campos de la física, la tecnología industrial, tecnología de la información y la medición, la medicina y la biología. Hoy en día, los ultrasonidos se han encontrado útiles en numerosos usos, abarcando la limpieza industrial y comercial de metales y tejidos, entre muchos más objetos de distintas áreas.

En la actualidad se han buscado diferentes caminos en el campo de la limpieza para volverla mucho más eficiente y práctica a los usuarios. En respuesta a esta búsqueda, se han generado los sistemas de limpieza por ultrasonido. Describiéndolos de forma muy general, consisten en un amplificador de frecuencia ultrasónica variable que genera frecuencias altas, y así lograr producir el fenómeno de la cavitación en un líquido limpiador que se encuentra en un taque. El sistema se divide en tres sub grupos para su mejor entendimiento: generador de señales, pre-amplificador, y el transductor ultrasónico. En la Fig. 1 se puede observar cómo se relacionan cada etapa o sub-grupo entre sí, para lograr la limpieza por ultrasonido (Basa et al., 2012).

El sistema antes mencionado trabaja para generar una señal de alta frecuencia, que será una señal de entrada a un transductor piezo eléctrico. Este es primordial para poder generar el fenómeno de la cavitación. Cuando el CPT (transductor piezoeléctrico), es activado por una fuente de corriente de frecuencia que es igual a su frecuencia de resonancia mecánica, éste vibra y crea la onda ultrasónica a través del líquido para producir las llamados *burbujas cavitación*.

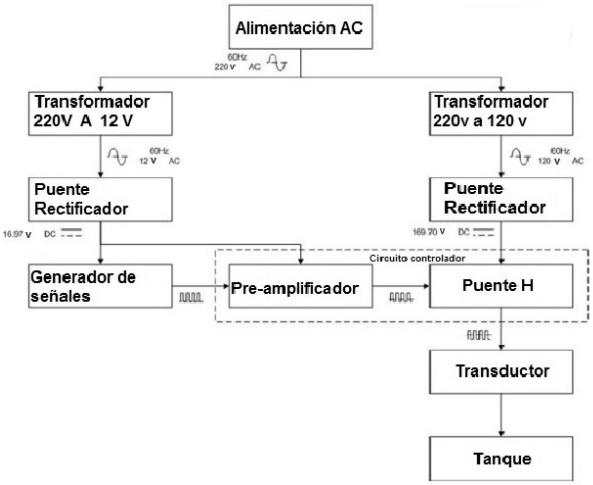


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema (Basa et al., 2012).

La cavitación consiste en la creación y expansión de burbujas microscópicas. Estas se someten a varias expansiones rápidas antes de alcanzar un radio crítico, momento en el que estas sufren un colapso violento. El movimiento de líquido y el contacto del burbujeo con la superficie del elemento a limpiar elimina la capa de suciedad, penetra agujeros visibles e invisibles, grietas, huecos y quita fuertemente adherencias o partículas incrustadas en las superficies de los materiales. En comparación con otras soluciones de limpieza, tales como los métodos de limpieza a base de químicos, los limpiadores ultrasónicos, son más respetuosos con el medio ambiente y han demostrado ser una solución más eficaz.

Se debe que tener en cuenta como factor de alta importancia la temperatura del líquido en el tanque, pues dependiendo de la relación de temperatura, y el líquido a usar, se puede conseguir una buena limpieza o por el contrario se obtendría un resultado negativo como el desprendimiento de partes microscópicas del material (Azhdast, Haleh, Pouladzadeh, Azhdast, y Soltanabadi, 2009; Buasri y Jangwanitlert, 2008; Fabijański y Lagoda, 1996; Harvey, Gachagan, y Mutasa, 2014; Kauczor y Frohleke, 2004; Niemczewski, 2014).

Para el montaje del circuito se prefieren los inversores resonantes, popularmente usado para generar una corriente sinusoidal de alta frecuencia que se conduce a transductores cerámicos piezoeléctricos. Entre los diversos tipos de convertidores resonantes existe el clase E, el cual es un inversor resonante que tiene una estructura muy simple y sólo utiliza un interruptor de potencia activa. Esto hace que el inversor resonante clase E sea una solución rentable y de peso ligero para aplicaciones de baja potencia. Existen diferentes

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

diseños con distintos inversores dependiendo del rango de potencia que sea diseñado el prototipo.

Convencionalmente, los inversores de alta frecuencia utilizan un diodo rectificador en puente con un condensador de filtrado. Tal circuito rectificador atrae inevitablemente una corriente de entrada de pulsos estrechos, resultando en grave distorsión total de armónicos de corriente (THD) y factor de potencia pobres (Martínez, Jacinto, y Castiblanco, 2013). Para cumplir con la regulación de armónicos, y para mejorar el factor de potencia, una etapa de conversión de potencia adicional, llamada la etapa de corrección de Factor de Potencia (PFC) se hace necesaria. Sin embargo, la etapa PFC adicional aumenta los costes generales de circuito, además de reducir la fiabilidad y la eficiencia. Estos problemas pueden ser resueltos mediante la integración de la etapa PFC en la etapa del inversor (Cheng, Cheng, Fang, y Yen, 2011).

En otro sistema propuesto se utiliza la integración de un convertidor de medio puente de salida con alimentación en paralelo con un inversor resonante. La salida del sistema es de 230 V de tensión sinusoidal con alta frecuencia de 28 KHz. Este sistema integrado es aplicable cuando se necesita de calentamiento por inducción de baja potencia (Athira y Deepa, 2014).

Otro trabajo relevante es el de (Peng, Wang, Su, y Lu, 2008). En este artículo se presenta un generador de 2 kW que tiene las funciones de seguimiento automático de señales de salida entre 10 y 20 kHz y el exceso de temperatura de protección. Este generador se compone de un convertidor de potencia con IGBT de puente completo, un circuito de control PWM digital y un circuito de control de retroalimentación de temperatura y corriente. Los resultados muestran que el generador de ultrasonidos es estable, potente y eficiente.

En otro trabajo se presenta el diseño e implementación de un generador de múltiple salida, con salida PWM de 48 kHz, controlado, para máquinas de limpieza por ultrasonidos. La parte digital completa incluye la frecuencia, el generador de impulsos y el controlador de pantalla de la unidad PWM, para conducir cuatro unidades de energía de ultrasonidos independientes. El esquema de control se ha implementado en un sola FPGA (Tangel, Yakut, Afacan, Güvenc, et al., 2010).

La última referencia considerada en el diseño es (Green, 1993). En este articulo se aplica una topología de convertidor resonante paralelo que produce energía de alta frecuencia. El convertidor utiliza dos transistores de potencia configurados en un *PUSH-PULL* de bajo costo que cuenta con baja emisión de RFI y de alta eficiencia, debido a la conmutación de voltaje cero y ausencia de corriente circulante en los dispositivos.

Nuestro diseño es un sistema de uso en la industria de la joyería (piezas pequeñas), por lo cual se implementó un tanque con capacidad de 1/2 galón de solución limpiadora y por consiguiente una potencia de salida de 60 W, utilizando un inversor tipo *PUSH-PULL* y señales PWM para la activación de sus interruptores y así generar una señal AC de 40 kHz, para la alimentación del transductor piezoelectrico, el cual genera el fenómeno de la cavitación, que es la que hace posible la innovadora forma de limpieza.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se presentan algunos conceptos preliminares, el perfil funcional del prototipo, y algunas otras consideraciones de diseño. En la Sección 3 se detalla completamente el diseño de la estructura del prototipo, incluyendo los criterios de selección y las especificaciones finales adoptadas. En la Sección 4 se presenta la evaluación del desempeño esperado del prototipo mediante un modelo funcional que considera dimensiones, formas y materiales del prototipo. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo.

Formulación del problema

Identificando como problemática principal, la difícil adquisición de los sistemas de limpieza por ultrasonido, debido a sus altos costos en el mercado y sumado a esto, los riesgos a los que están expuestas las personas que tienen contacto directo con los elementos y disolventes utilizados en el trabajo de limpieza, en respuesta a estas problemáticas se formula la necesidad del diseño y construcción de un prototipo, para lograr obtener un proceso de limpieza de calidad, seguro y de bajo costo.

Existen hoy en día en el mercado varias empresas que diseñan equipos de limpieza por ultrasonido. Básicamente, la propuesta es el de construir un sistema para PYMES (pequeñas y medianas empresas), y personas del común que tengan la necesidad de usar este tipo de técnica. Esto quiere decir, a un costo asequible, ya que las empresas que lo construyen en la actualidad lo comercializan a un alto costo, por ser sistemas diseñados para grandes industrias, en la investigación se encontraron algunas referencias sobre los altos costos de los sistemas de limpieza.

Ademas, la falta de conocimiento que existe en el país acerca del ultrasonido y sus diferentes aplicaciones, es una de la principales causas que hace que las industrias colombianas no estén familiarizadas con el uso de procesos de limpieza por ultrasonidos y por tanto que no sean demandantes y/u oferentes de los mismos. La meta es abrir paso a esta tecnología que no es tan conocida y aplicada, pero es de gran eficiencia y de fácil uso. Aportando así al desarrollo, en cuanto a las aplicaciones del ultrasonido en muchos sectores del entorno local.

Perfil funcional

Los sistemas de limpieza por ultrasonido, son equipos que utilizan un fenómeno físico llamado cavitación, para realizar la tarea de limpieza en los elementos, este fenómeno consiste en la creación y expansión de cavidades de gas en un liquido,

esta expansión llega a un puto critico y es el momento en que explota, a esto es lo que podemos llamar burbujeo, este se produce a unas dimensiones microscópicas, pero tal es la fuerza de su explosión que es capaz de remover la suciedad de los elemento inmersos en el liquido, para lograr producir este fenómeno en un liquido limpiador, es necesario irradiar el tanque que contiene a este con ultrasonido, el encargado de producirlo es un transductor piezoelectrico, este es alimentado por señales de tension conmutadas a una frecuencia especifica, generadas por medio de una tarjeta de control y obteniendo como salida una señal ultrasonica capaz de producir el fenómeno en el liquido.

Existe diferentes equipos de limpieza, estos se pueden clasificar básicamente en el tamaño de los elementos a limpiar, ya que no solamente existen equipos para limpieza de cosas pequeñas, si no objetos muy grandes, como motores de vehículos y similares, al momento de diseñar un prototipo de estos, es necesario tener en cuenta varias características, ya que dependiendo el área de aplicación del sistema de limpieza, se necesitara una frecuencia especifica, una cantidad de liquido especifico, un solvente limpiador adecuado y un tiempo de lavado exacto, todo esto es para la mayor eficiencia de limpieza y evitar el daño de los elementos. Una de las ventajas mas grande de utilizar esta técnica, es que es una limpieza que llega a toda parte inaccesible en todo tipo de pieza grande o pequeña.

El perfil de aplicación y funcionalidad del prototipo presentado en este articulo, es un sistema de limpieza para la industria de la joyería, utilizando un inversor de topo-logia *PUSH-PULL* y alimentado por señales PWM para la conmutación de sus interruptores MOSFET, la frecuencia de trabajo del inversor es de 40 kHz que es la recomendada para este tipo de piezas, ademas el contenedor construido tiene una capacidad de 1/2 galón, que es mas que suficiente para el lavado de las joyas; ya que la potencia de salida esta directamente ligada a la cantidad de liquido, el circuito se diseño con una potencia de salida de 60 W que es la adecuada para el buen funcionamiento del equipo.

Metodología

Según PPB MEGASONICS, una empresa reconocida internacional mente por fabricar medidores de cavitación para limpiadores ultrasónicos, y algunos estudios hechos sobre la cavitación acústica y sus efectos de limpieza, la energía requerida para generar una fuerza cavitadora lo suficientemente grande para limpiar debe ser de 50W-100W por galón de agua (es pertinente aclarar que hay otro tipo de parámetros que pueden intervenir en estos datos como: la frecuencia, la amplitud, la temperatura del agua, tiempo de exposición y propiedades físicas y químicas del solvente) (Niño, Mendez, y Salas, 2010).

Ya que el sistema se diseño para aplicaciones de limpieza en toda clase de joyería(piezas pequeñas), razón por la cual se pretende hacer un limpiador con capacidad de 1/2 galón, se decidió seleccionar una potencia de salida de 60 W (para maximizar el proceso de limpieza).

Y según los fabricantes actuales de estos sistemas, la frecuencia mas adecuada para la limpieza de este tipo de elementos es la de 40 kHz.

Transductor piezo eléctrico

Como primer paso en la construcción del proyecto se debe seleccionar el transductor piezo eléctrico, ya que al saber sus características físicas y eléctricas se podrá desarrollar el resto de los componentes.

El transductor que se adquirió fue el Hesentec rank:D Fig. 2 y es el adecuado según las necesidades que tenemos para nuestro proyecto.

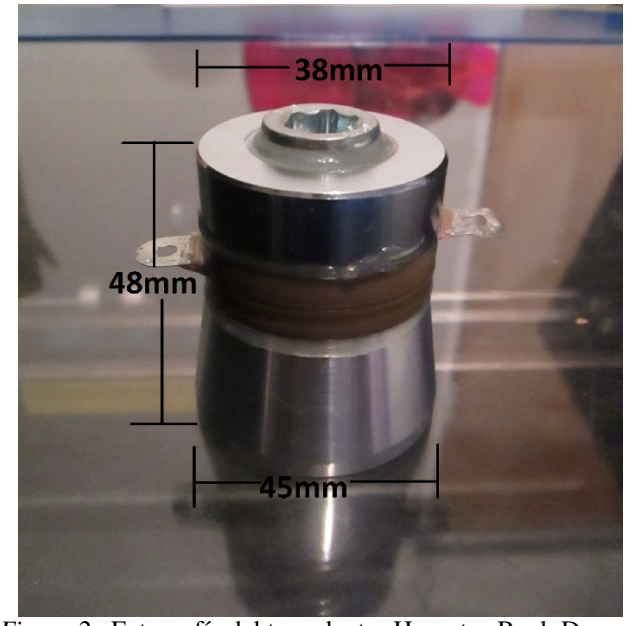


Figura 2. Fotografía del transductor Hesentec Rank:D.

- Frecuencia: 40 kHz
- Potencia: 60 W
- Tamaño: 45 Dia. x 55 H mm/1.77x2.17 pulgadas
- Peso: 306 g
- Instalación del transductor

Para la instalación del transductor se presenta un esquemático para su mejor entendimiento Fig. 3.

Evaluación de la tarjeta de control

Para el control inicial del sistema se adquirió una tarjeta de control (*driver board*), genérica de 60 W a 40 kHz referencia YDE2-60W (Fig. 4). Las primeras pruebas de operación del sistema se realizaron con dicha tarjeta.

Esta tarjeta es extremadamente económica (25 USD), muy simple, con conexión directa al transductor y teóricamente

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

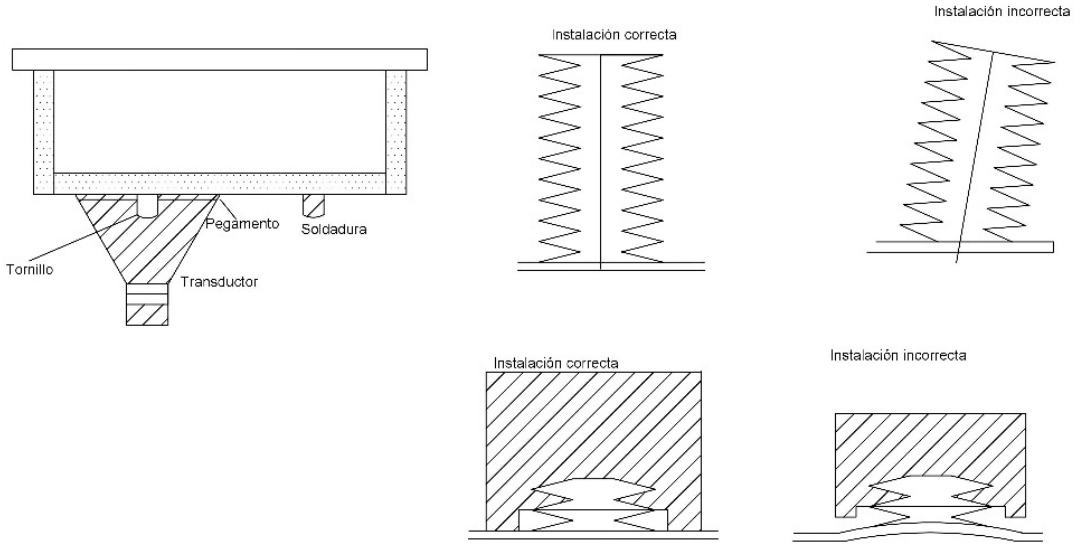


Figura 3. Diagrama para la correcta instalación del transductor.

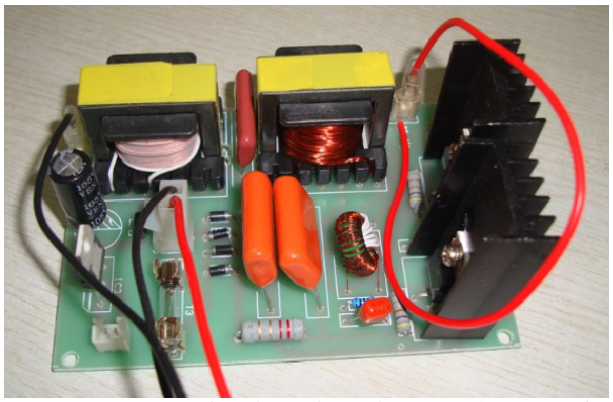


Figura 4. Fotografía de tarjeta de control YDE2-60W adquirida para las pruebas iniciales.

protegida por sobre-corriente y sobre-voltaje. Sin embargo, debido a su pobre diseño, tiene una alta tendencia a quemarse, como efectivamente ocurrió luego de su segunda conexión.

El circuito de esta tarjeta (Fig. 5) se compone por una entrada de 120 Vac (aunque es posible alimentarla a 220 Vac), rectificada a onda completa y pobremente filtrada (el voltaje directo promedio es de 109 Vdc). Este voltaje es dividido a la mitad en dos buses por medio de los condensadores C3 y C4. Un extremo del transformador de salida, T1, es conectado al punto común central, mientras que los transistores de potencia Q1 y Q2 se conectan al otro extremo para inyectar al primario la señal conmutada de 40 kHz.

El secundario de T1 amplifica este voltaje, mientras que el transformador T2 realmente funciona como un choque de filtrado de salida bastante burdo (su primario esta en corto, no hace nada). La señal de voltaje conmutada a 40 kHz que se aplica al transductor es mustreada por la bobina L1-1 del toroide y re-alimentada a los circuitos de base de los transistores de potencia. Esta re-alimentación ayuda a encender y apagar los transistores de potencia de forma alternada, pero dado que el control no es directo, la salida no es una señal cuadrada como se esperaría.

Este circuito como tal es en realidad un oscilador Royer Fig. 6. El circuito utiliza un transformador con núcleo saturable (la idea es que soporte corrientes DC) con tap central en el devanado primario, y un devanado adicional de re-alimentación. El secundario se utiliza para obtener la salida aislada galvánica mente, pero no interviene en la oscilación.

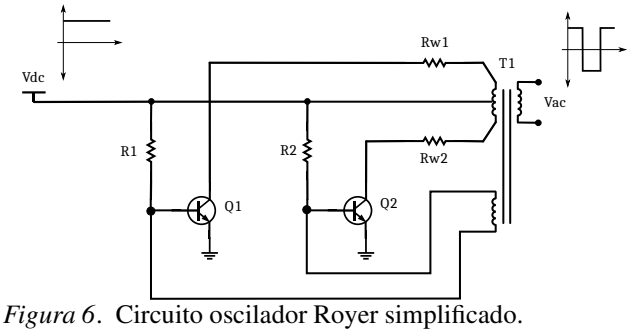


Figura 6. Circuito oscilador Royer simplificado.

Las dos mitades del primario son manejadas por dos transistores bipolares de potencia en configuración

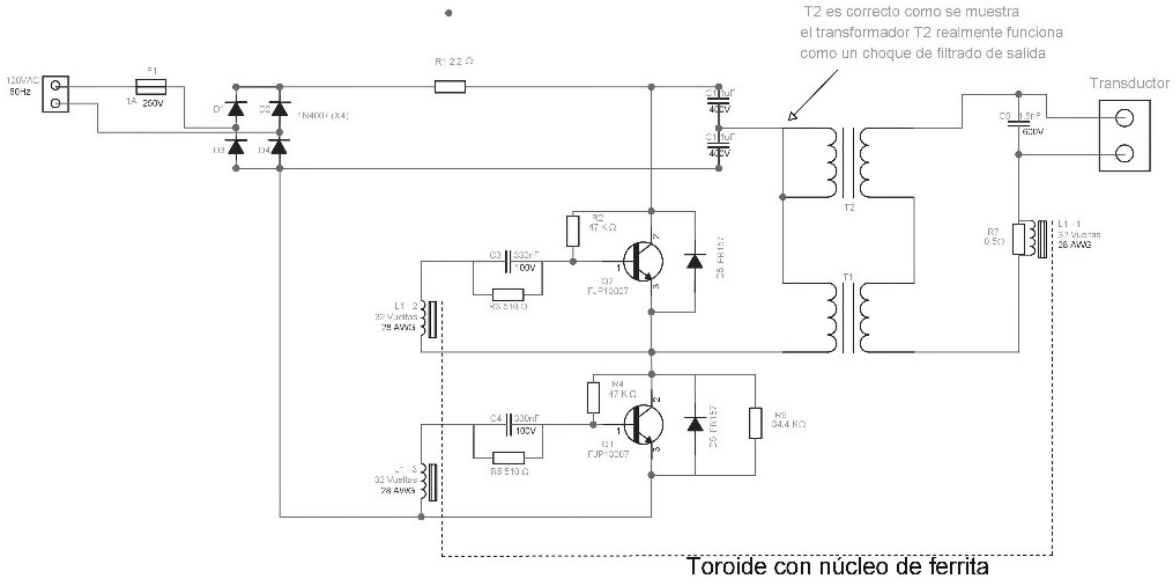


Figura 5. Esquema eléctrico derivado de la tarjeta de control YDE2-60W.

PUSH-PULL. El devanado de re-alimentación transfiere una pequeña cantidad del flujo en el transformador a la base de los transistores a modo de re-alimentación positiva, lo cual produce la oscilación. La frecuencia de oscilación es determinada por el valor máximo de densidad de flujo magnético (es decir, el material utilizado en la ferrita), el voltaje DC de entrada y la inductancia del devanado primario.

El circuito es bastante simple, muy utilizado en electrónica de potencia, e idealmente genera una onda de salida cuadrada. Sin embargo, en esta tarjeta no se garantiza la calidad del bus de voltaje DC ni de la carga. A continuación se resumen los problemas de diseño encontrados en la tarjeta:

- No hay protección de sobrecarga, lo que hace que se queme con facilidad. Este es el problema más grave del circuito. Tal como esta, el circuito genera un voltaje apropiado para una relativamente alta impedancia. Si se conecta el circuito sin transductor se presentará a la salida un circuito altamente sintonizado de baja impedancia, lo que exigirá fácilmente una corriente de cinco a 10 veces mas alta de la esperada en los transistores, los cuales se queman en segundos. Esto fácilmente pasa si en algún instante se desconecta el transductor. Este es un problema amplia mente conocido en los equipos de limpieza por ultrasonido comerciales, razón por la cual los fabricantes recomiendan garantizar el llenado del tanque antes del encendido del equipo.
- El circuito en genérico, pensado para trabajar con cualquier nivel de tensión AC, y con mal circuito de filtrado. Como consecuencia el bus DC posee mucho ruido, amplias variaciones, y por ende, no genera una señal cuadrada de salida. Esto, sin embargo, no presenta problemas para la operación del transductor.
- No hay forma de ajustar la potencia de salida. Realmente no existe posibilidad de ajustar nada en el circuito, lo cual es crítico cuando no se puede variar el bus DC y el transductor no opera en su punto ideal (lo cual es identificable por que se calienta), con lo que se reduce considerablemente la cavitación. De hecho, variaciones en la tensión de entrada pueden hacer que se vea una muy baja impedancia de salida, se aumente la corriente de salida, y se quemen los transistores.
- No es posible medir las señales durante la operación del circuito. La sola conexión de las sondas altera la frecuencia de operación, lo que nuevamente hace que se incremente la corriente en los transistores de potencia, y se quemen, precisamente lo que ocurrió con la tarjeta durante las pruebas iniciales.

El voltaje en el secundario del transformador T1 aumenta de tres a cuatro veces la señal DC rectificada y dividida, no fue posible digitalizar esta señal durante el tiempo que funcionó la tarjeta, sin embargo el valor pico se detectó cerca de los 300 V, lo que indicaba funcionamiento del circuito resonante de salida, aunque la señal parecía más una onda triangular, lejos de la onda cuadrada esperada.

Al adquirir la tarjeta YDE2-60W, se procedió a realizar una primera prueba para remover la suciedad en una moneda, donde se observó que efectivamente ésta funcionaba correctamente, luego se quiso realizar una segunda prueba y al momento de conectar la tarjeta por segunda vez, se

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

quemó como ya se mencionó anteriormente y donde se puedo evidenciar en algunas pistas levantadas de la tarjeta Fig. 7.

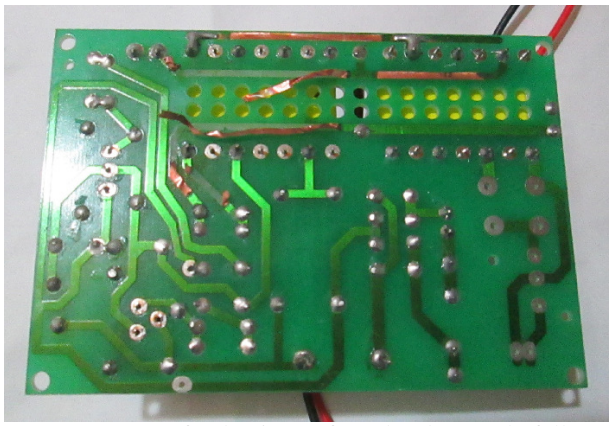


Figura 7. Fotografía de pistas afectadas durante la falla.

Lo siguiente fue desmontar los dos transistores bipolares Fig. 8, para verificar su correcto funcionamiento, en Q1 la medir continuidad entre sus pines, se evidencio que ningún pin quedo en corto con ningún otro, todos quedaron abiertos entre si, en Q2 quedo en corto el pin 1 (BASE), con pin 3 (EMISOR), tomando la medida con el positivo de multímetro en el pin 1 y luego el positivo en el pin 3, en ambos casos el multímetro mostraba que estaban en corto estos dos pines, las siguientes medidas mostraban que los demás pines se encontraban abiertos entre si sin importar el sentido de las puntas, ya que se sabe que estos son transistores tipo NPN, nos damos cuenta que se quemaron al momento del corto.

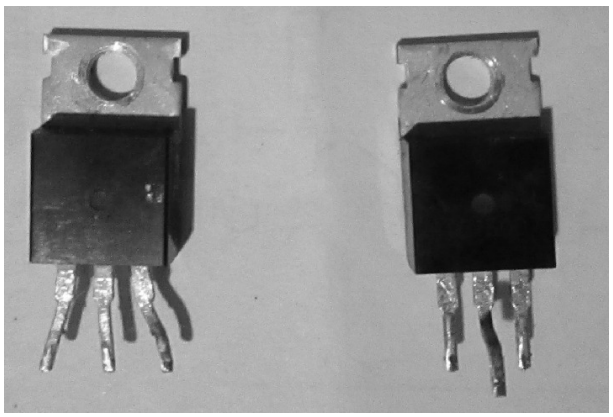


Figura 8. Fotografía de transistores bipolares STD13007.

Diseño de la tarjeta de control

- Circuito de potencia

Como primera instancia se decidió seleccionar la clase *PUSH-PULL* Fig. 9. como topo-logia para el inversor. Esto requiere un transformador con derivación central en un primario. Para entender el funcionamiento de este inversor, primero supondremos que la corriente de salida io fluye en forma continua. Según esta suposición, cuando el interruptor T1 está encendido (y T2 está apagado), T1 conduciría para un valor positivo de io, y D1 conduciría para un valor negativo de io. Por tanto, independientemente del sentido de io, vo = Vd /n, donde n es la relación de vueltas del transformador entre la mitad primaria y los bobinados secundarios, como se muestra en la figura. Del mismo modo, cuando T2 está encendido (y T1 está apagado), vo = Vd /n (Mohan, 2009).

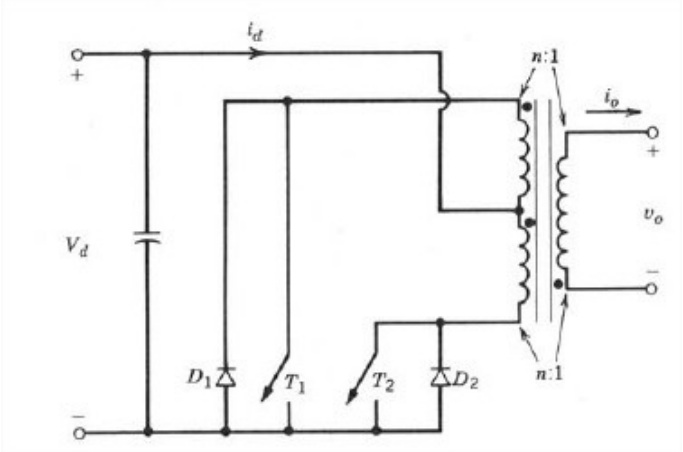


Figura 9. Inversor en configuración *PUSH-PULL* (Mohan, 2009).

Ya como se menciono anteriormente, el sistema esta diseñado para aplicaciones de limpieza en toda clase de joyería, y ya que se tiene una potencia de salida conocida de 60 W, se procede al diseño de la nueva tarjeta generadora de ultrasonido.

$$Po = 60w \tag{1}$$

$$Pin = 120 * \sqrt{2} = 170V \tag{2}$$

Para el desarrollo de la nueva tarjeta se procedió a hacer un inversor AC a DC para el cual se construyo un rectificador de onda completa usando diodos rectificadores 1n4004 y luego se conecto a la salida del rectificador un condensador de 330 uF a 400 V, para que este ultimo tolerara de manera efectiva la tension a la salida del puente. Para conocer el valor de la capacitancia requerida para el filtrado usamos la siguiente expresión:

$$C = \frac{I}{v * F} \tag{3}$$

Para saber la tension adecuada a la cual debe estar alimentada el transductor, es necesario conocer el comportamiento(la impedancia) del transductor específicamente en su frecuencia de resonancia, con la

ayuda del puente RLC del laboratorio de maquinas de la facultad tecnológica, fue posible este calculo, ya que este es un equipo que nos permite medir o conocer valores de resistencia,capacitancias e inductancias, o en este caso especifico el valor de la impedancia de cargas en un rango de frecuencias de 1 Hz hasta 1 MHz, para nuestro caso especifico se realizo una primera prueba al transductor en vació (sin estar sujeto al tanque), haciéndole un barrido de frecuencias desde los 30 kHz hasta los 50 kHz con saltos de 1 kHz, para determinar su comportamiento antes y después de su valor de resonancia que es 40 kHz según lo dado por el fabricante Fig. 10. Después de esto se realizo una segunda prueba al transductor, pero en esta ocasión con carga (sujeto al tanque lleno de liquido), tomando un rango de frecuencia mas amplio desde los 25 kHz hasta los 50 kHz igualmente con saltos de 1 kHz Fig. 11.

Las gráficas anteriores se realizaron con el fin de conocer la frecuencia real de resonancia del transductor, ya que no es seguro confiar en la dada por el fabricante y además esta puede cambiar cuando el transductor se acopla al tanque, a su vez conocer la impedancia que corresponde con esta frecuencia obtenida. Según las empresas que se dedican a el estudio de los transductores y a la venta de equipos analizadores de estos, cuando el transductor presenta la menor impedancia, se encuentra en su frecuencia real de resonancia (ATCP Engenharia F % , 2016). Analizando la primera gráfica (transductor en vació), se observa claramente que la frecuencia de resonancia real es de 39.5 kHz, y al hacer la comparación se obtiene que es aproximadamente el valor dado por el fabricante del producto, es decir 40 kHz, Ya en la segunda gráfica obtenemos resultados muy distintos y se ve claramente cómo se afecta la impedancia del transductor cuando está sujeto al tanque lleno de agua, esta gráfica da como resultado una frecuencia de resonancia de 42 kHz con una impedancia de 319 ohmios, es con este valor que se podrá despejar Vo.

$$P = \frac{v^2}{R} \tag{4}$$

$$Vo = \sqrt[2]{60 * 319} \tag{5}$$

$$Vop = 138V \tag{6}$$

$$Iop = \frac{60w}{138V} = 0{,}43A \tag{7}$$

Asumimos eficiencia del 70 %

$$\eta = 70\,\% \tag{8}$$

$$\Rightarrow Pin = \frac{Po * 100}{\eta} = \frac{60 * 100}{70} = 87{,}5w \tag{9}$$

Con onda cuadrada y rectificando la onda completa, la corriente de entrada se puede calcular como:

$$Iin = \frac{Pin}{Vin} = \frac{85{,}7}{170} = 0{,}5A \tag{10}$$

- Calibre de conductor entrada primario

Se selecciono según tablas un calibre de 21 AWG para los 0.5A. Su diámetro es 0.072 cm y su área es de 0.004105cm$\hat{2}$.

- Numero de vueltas primario

El primario es bifilar entonces cada vuelta gasta un espacio de 0.072 cm x 2=0.144 cm, ya que el circuito es un *PUSH-PULL*, el recorrido de la densidad de flujo total de (-*B* a *B*), se da en cada medio ciclo. Una ferrita típica para transformadores puede operar de forma segura (sin saturarse) a una densidad de flujo de 270 mT, valor seguro seleccionado. El barrido total seria 270 mT x 2 = 540 mT.

Para seleccionar el tamaño del núcleo se considera tanto como la potencia como el numero de vueltas requerido. El numero de vueltas en el primario esta dado por

$$Np = \frac{Vdcx * Ton}{\Delta B * Ae} \tag{11}$$

$$\Delta B = Enteslas \tag{12}$$

$$Ton = \frac{(\frac{1}{40KHz})}{2} en\mu S \tag{13}$$

$$Ae = areaefectivadelnucleoenmm^2 \rightarrow Proprcionalalapotencia \tag{14}$$

De las tablas de fabricantes de núcleos para una potencia de 60 W, frecuencia de 40 kHz y configuración *PUSH-PULL*. Se requiere un núcleo con un AP (AP = Au*Ae), mayor o igual a 0.45 cm$\hat{4}$, un posible núcleo seleccionado por catalogo seria el Ferroscube RM10, el cual tiene un Ae = 96.6mm$\hat{2}$.

$$AP = [\frac{11{,}1 * P}{K * \Delta B * F}]^{1,1+3} cm^4 \tag{15}$$

$$Np = \frac{170 * 12{,}5}{0{,}5 * 96{,}6} = 43{,}99 vueltas \tag{16}$$

Al saber los requerimientos para el núcleo, se pudo adquirir en el mercado uno de ferrita con un ap = 4.91 cm$\hat{4}$, re calculando el numero de vueltas en el primario con este nuevo núcleo, nos daría el siguiente numero de vueltas:

$$Np = \frac{170 * 12{,}5}{0{,}5 * 256} = 16 vueltas \tag{17}$$

El diseño de la formaleta para arrollar el alambre se desarrollo en el programa Sketchup e impreso en impresora 3D Fig. 12.

- Generación señal PWM

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

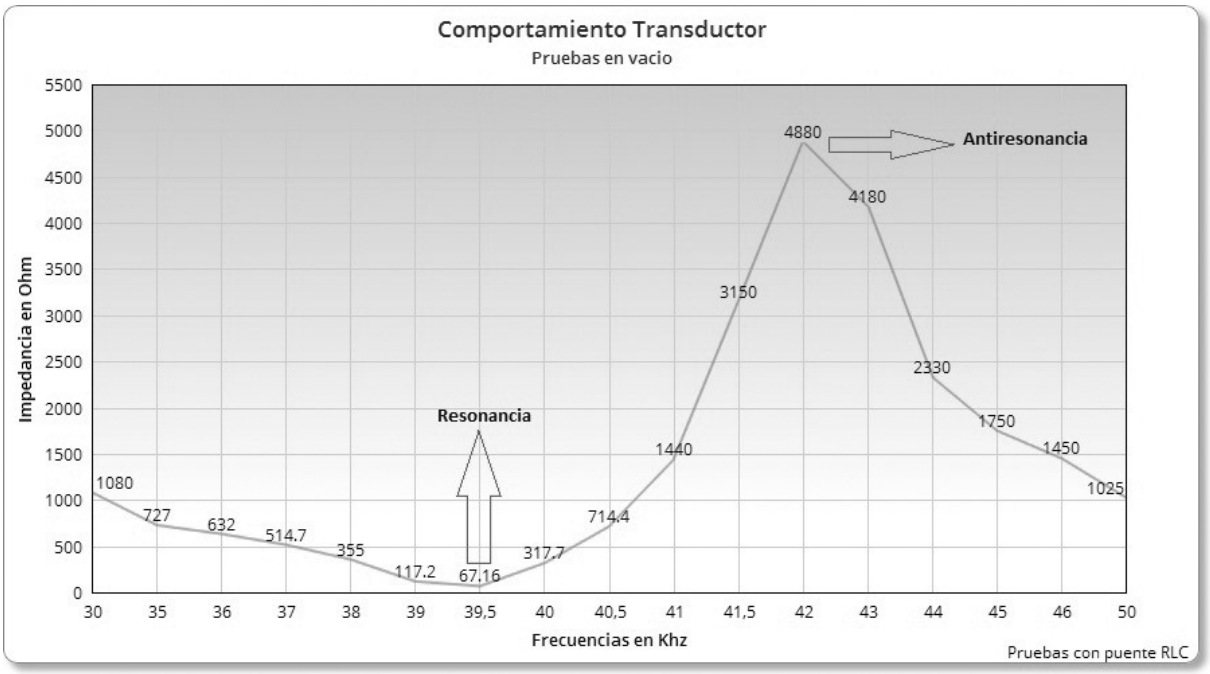


Figura 10. Curva del transductor en vacío.

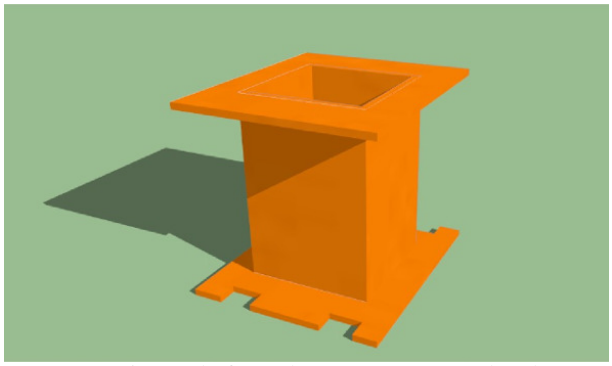


Figura 12. Diseño de formaleta en programa Sketchup.

Como antes se menciono el tipo de inversor a utilizar es el *PUSH-PULL*, así que se necesita de la activación de sus interruptores a un a frecuencia de 40 kHz, para esto es necesario las señales PWM. Las señales PWM son señales cuadradas en las cuales podemos modificar su ciclo de trabajo y su frecuencia según la necesidad que se tenga.

En el nuevo nuevo diseño a diferencia de la tarjeta YDE2-60W, la señal de 40 kHz es generada digital mente por un micro controlador, en primera instancia se decido utilizar MOSFET IRF840, que se utilizan como interruptores de alta frecuencia para la conmutación de las señales PWM, los cuales tiene la siguientes características eléctricas Fig. 13.

Acá aparece el primer inconveniente y es el nivel de tension de activación de los MOSFET, que es de 15 V y como bien se sabe los micro controladores tiene una tension de salida de 5 V, la solución a esto es la construcción de un circuito *driver* Fig. 14, que se va a encargar de hacer el puente entre micro controlador y MOSFET.

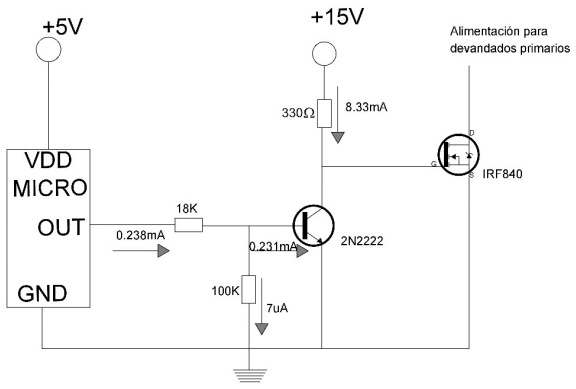


Figura 14. Circuito Driver par la activación de los MOSFET.

La resistencia de 300 ohmios sirve para limitar esta corriente inicial. Podríamos usar cualquier valor de resistencia pero un valor bajo permite la carga rápida de los capacitores parásitos que aparecen en el GATE del MOSFET y por lo tanto una conmutación más veloz de él.

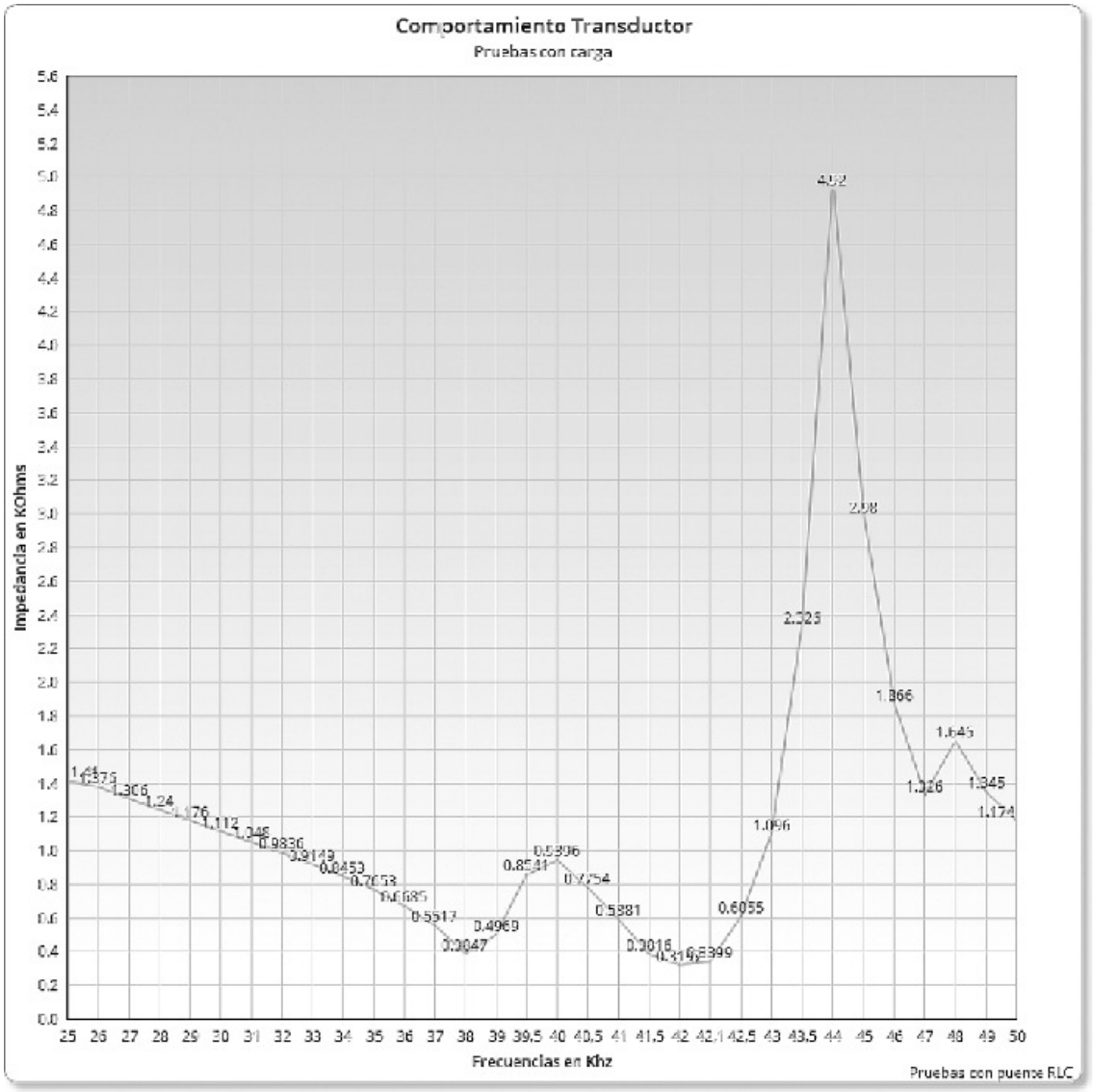


Figura 11. Curva del transductor con carga.

La resistencia de 100 KΩ a masa sirve para definir un estado lógico preciso en el caso que el micro no lo hiciese como por ejemplo en la fase de inicialización del mismo.

La resistencia de la base se obtiene aparir de la corriente que va manejar el transistor y la ganancia mínima de este, primero se decidió una corriente de 8.33 mA para garantizar la carga de los capacitares y con una ganancia mínima de 30 en este transistor se aplica la siguiente formula para obtener el valor de la R de base.

$$\frac{Voltaje - 07}{\frac{coriente}{hfe}} \tag{18}$$

Donde:

- Voltaje: Es la tensión que proporciona la pata del micro controlador, normalmente 5 o 3,3 V. Se resta 0,7 V porque es la caída de tensión típica entre la base y el emisor de un transistor.
- Corriente: Es la corriente que consume el circuito que queremos encender o apagar.
- hFe: Es la ganancia de corriente (si hay varios valores elegir el más pequeño).

$$\frac{4{,}7}{\frac{8{,}33x10^{-3}}{30}} \tag{19}$$

El transistor es un *2N2222*, es un transistor de alta frecuencia y es utilizado en su función de amplificador.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

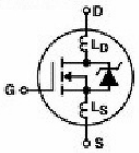
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	V_{GS} = 0V, I_D = 250μA (Figure 10)		500	-	-	V
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250μA		2.0	-	4.0	V
Zero-Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	V_{DS} = Rated BV_{DSS}, V_{GS} = 0V		-	-	25	μA
		V_{DS} = 0.8 x Rated BV_{DSS}, V_{GS} = 0V, T_J = 125°C		-	-	250	μA
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	V_{DS} > $I_{D(ON)}$ x $r_{DS(ON)MAX}$, V_{GS} = 10V		8.0	-	-	A
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	V_{GS} = ±20V		-	-	±100	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	V_{GS} = 10V, I_D = 4.4A (Figures 8, 9)		-	0.8	0.85	Ω
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	V_{DS} ≥ 50V, I_D = 4.4A (Figure 12)		4.9	7.4	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{D(ON)}$	V_{DD} = 250V, I_D ≈ 8A, R_G = 9.1Ω, R_L = 30Ω MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature.		-	15	21	ns
Rise Time	t_r			-	21	35	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{D(OFF)}$			-	50	74	ns
Fall Time	t_f			-	20	30	ns
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_{g(TOT)}$	V_{GS} = 10V, I_D = 8A, V_{DS} = 0.8 x Rated BV_{DSS} $I_{g(REF)}$ = 1.5mA (Figure 14) Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature		-	42	63	nC
Gate to Source Charge	Q_{gs}			-	7.0	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	Q_{gd}			-	22	-	nC
Input Capacitance	C_{ISS}	V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1.0MHz (Figure 11)		-	1225	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}			-	200	-	pF
Reverse-Transfer Capacitance	C_{RSS}			-	85	-	pF
Internal Drain Inductance	L_D	Measured from the Contact Screw on Tab to Center of Die	Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Devices Inductances	-	3.5	-	nH
		Measured from the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to Center of Die		-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S	Measured from the Source Lead, 6mm (0.25in) from Header to Source Bonding Pad		-	7.5	-	nH
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$			-	-	1.0	°C/W
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free Air Operation		-	-	62.5	°C/W

Figura 13. Características eléctricas del MOSFET IRF840 (semiconductor, 2002).

El principio de funcionamiento es muy simple. Cuando la salida del micro controlador tiene un nivel lógico bajo (0 V), el transistor no conduce y por lo tanto, su colector, que se encuentra conectado al GATE del MOSFET tendrá un potencial positivo de 15 V a través de la resistencia a positivo. Cuando la salida del micro controlador pasa a nivel alto, (5 V), el transistor conduce y lleva el GATE del MOSFET a 0 V, por lo tanto el MOSFET deja de conducir. Como podrán observar, este circuito tiene el defecto que trabaja al contrario es decir, se activa cuando el nivel de salida del micro es bajo.

Ya al tener el circuito para activar los MOSFET, se procede a generar dos señales PWM a una frecuencia de 40 kHz y agregando tiempos muertos a las señales, ya que en el tiempo que demora en la activación de un MOSFET y la desactivación del otro, pueden quedar encendidos los dos y producir un corto circuito, esto se genero mediante ARDUINO UNO realizando este sencillo programa:

```
byte valorA = B10000000;
byte valorB = B01000000;
byte valorZ = B00000000;

void setup()
  {
   DDRD = B11111111;

  }

void loop()
  {


    PORTD = valorA;
    delayMicroseconds(12);
    PORTD = valorZ;
    delayMicroseconds(1);
    PORTD = valorB;
    delayMicroseconds(12);
    PORTD = valorZ;
    delayMicroseconds(1);
   }
```

Como primera herramienta para verificar el buen funcionamiento del ARDUINO, se utilizó el simulador Proteus (Figs. 15 y 16).

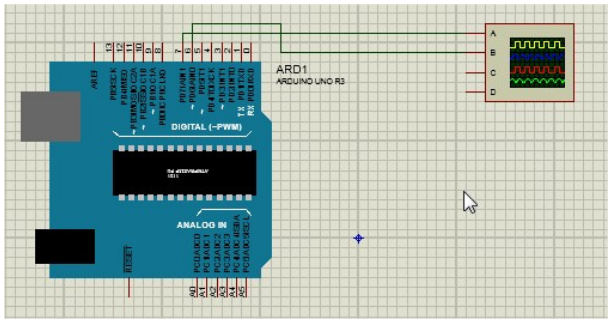


Figura 15. Simulacion de ARDUINO en el programa Proteus.

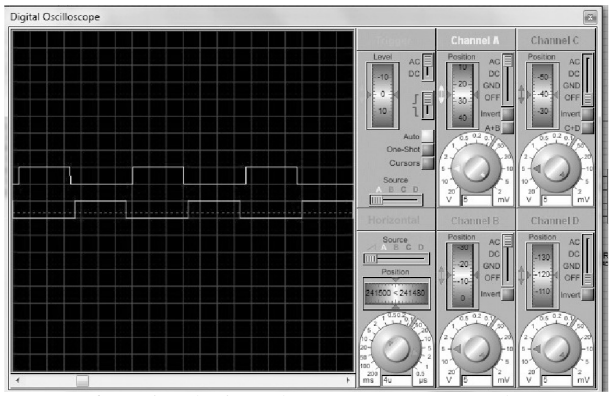


Figura 16. Simulacion de ARDUINO en el programa Proteus.

Diseño del contenedor

Como lineamientos para la construcción se debe tener en cuenta la forma física del transductor piezo eléctrico y de la tarjeta de control diseñada.

Para comenzar, es necesario tener en cuenta las referencias de potencia de transducción por galón recomendadas por PPB MEGASONICS62 de 50 W - 100 W por galón de agua. Por esto se decidió utilizar un transductor de 60 W para un contenedor de 1/2 galón de capacidad (Niño et al., 2010).

El material que se selecciono para el tanque es aluminio, ya que es un material muy resistente, que no se oxida y de muy fácil adquisición, en este proyecto se decidió utilizar una olla de casa, con las características adecuadas de capacidad y adaptación del transductor, ya que se pretende que sea del mas bajo costo posible y es un elemento que siempre se encuentra fácil o muy económico. En la actualidad el material utilizado es el acero inoxidable, debido a su durabilidad, flexibilidad, resistencia al calor y asepsia, pero es un elemento muy costoso y elevaría el costo del proyecto considerablemente.

Como estructura para el contenedor, se decidió construirlo con madera, la forma y tamaño de este va conforme al tamaño de la olla y del circuito eléctrico de control, fue hecho con pedazos de madera desechados por una empresa y reciclados para la construcción del contenedor Fig. 17. Otro factor fue el diseño del sistema de desagüe, que consiste en un tubo de *CPVC* conectado en la base de la olla y en su extremo conectado a un registro, para controlar el vaciado del tanque.

Figura 17. Fotografía del contenedor.

Diagrama de bloques

Para finalizar con la metodología se expone el funcionamiento de todo el circuito mediante el simulador Simplorer Fig. 18. y se describe de forma muy general el funcionamiento del sistema mediante un diagrama de bloques Fig. 19

Evaluación de desempeño

Antes de hacer las pruebas de limpieza, se decidió comprobar el buen funcionamiento de cada etapa del sistema para asegurar el éxito de la maquina.

Como pruebas iniciales se verifico la señal rectificada de 170V DC, con la ayuda del osciloscopio Rigol DS1052D se observó la señal rectificada y filtrada satisfactoriamente a los 170 V DC Fig. 20.

El siguiente paso fue confirmar que en las salidas del ARDUINO se encontraran las respectivas señales PWM conmutando a los 42 kHz Fig. 21. y con sus respectivos tiempos muertos Fig. 22. Estas pruebas al igual se corroboraron con el osciloscopio.

Luego de estar seguros de las salidas del ARDUINO, se dio paso a observar el correcto funcionamiento de cada uno de los circuitos *driver*, para la activación de cada uno de los

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

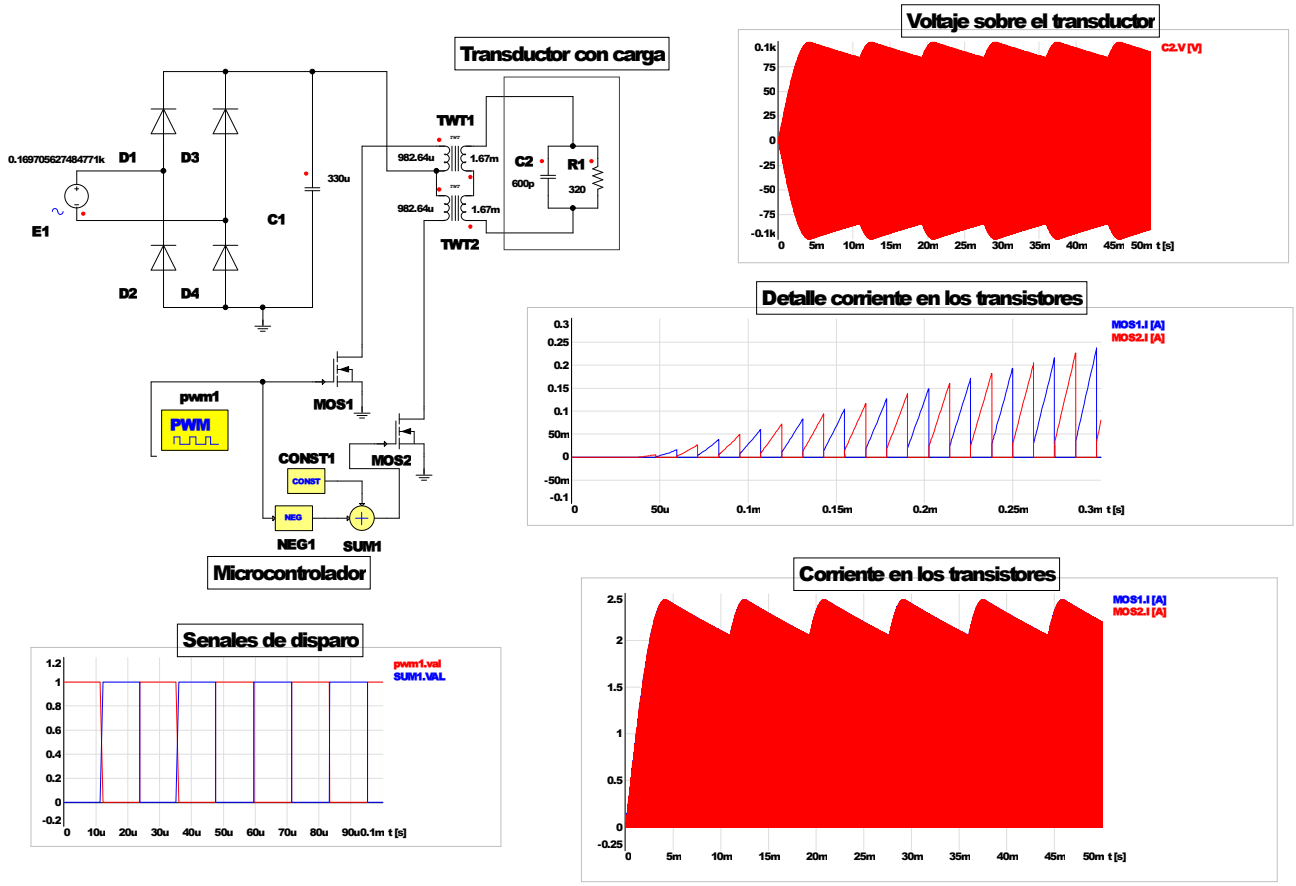


Figura 18. Simulación del circuito con el software Simplorer.

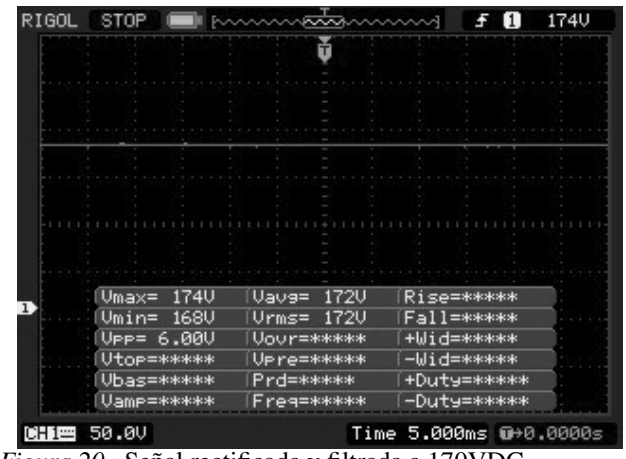


Figura 20. Señal rectificada y filtrada a 170VDC.

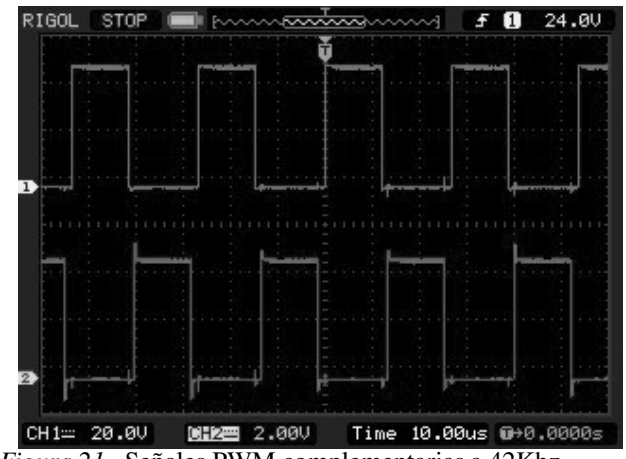


Figura 21. Señales PWM complementarias a 42Khz.

MOSFET, donde se observo la correcta activación de cada uno a los 42 kHz.

Al ratificar el buen funcionamiento de cada etapa del equipo se hicieron pruebas finales, observando la potencia que entregaba el sistema para verificar que tan eficiente fue, para esto se gráfico en el software Microsoft Excel, un periodo de la señal de tension de salida, obteniendo los puntos con el osciloscopio (Fig. 23). Luego se genero la

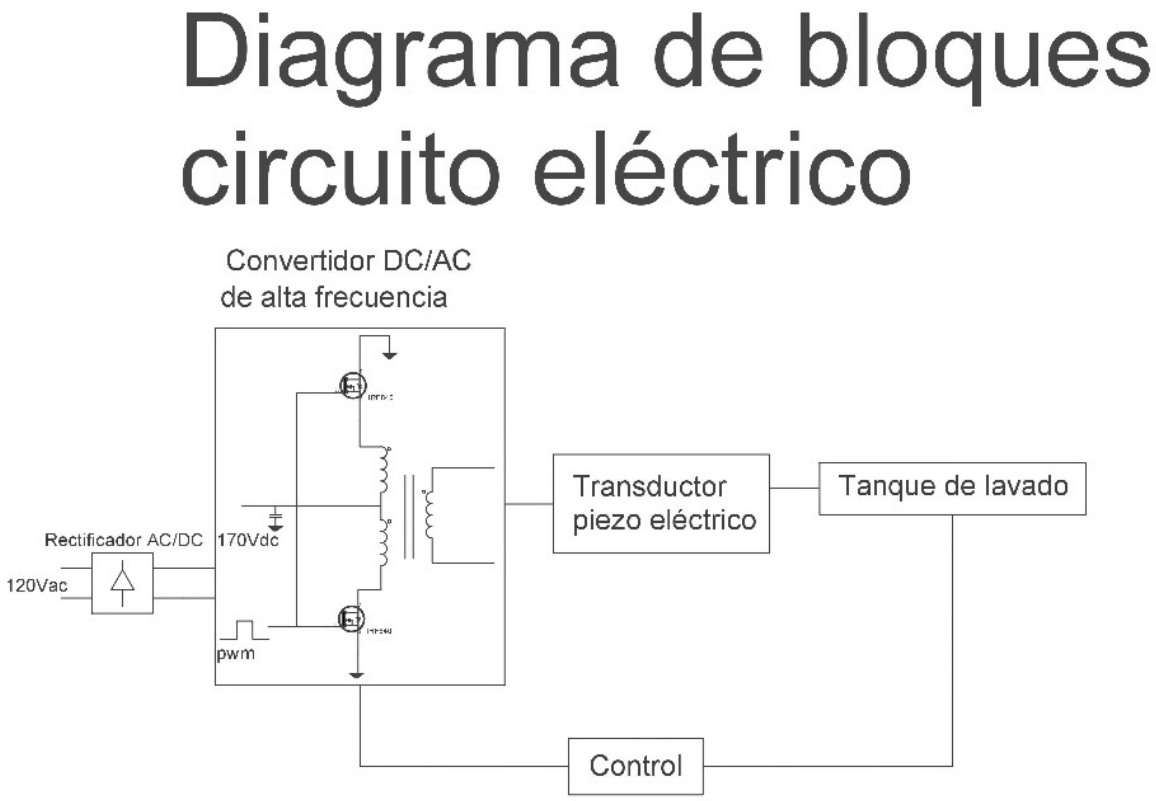


Figura 19. Diagrama de bloques del funcionamiento total del sistema .

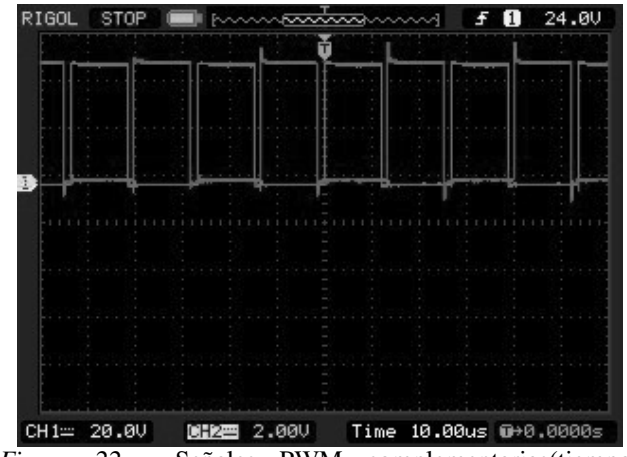


Figura 22. Señales PWM complementarias(tiempos muertos).

señal de potencia de salida, elevando al cuadrado la tension y dividiendo en la impedancia (319 Ω) punto a punto de la gráfica de tension, observando una potencia instantánea pico de 20 W (Fig. 24).

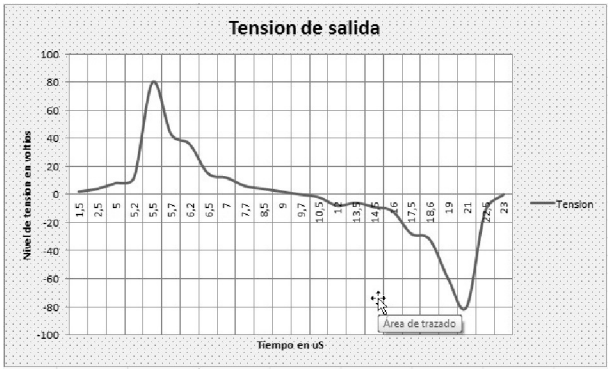


Figura 23. Señal de tension de salida.

Conclusiones

- Como resultado de la investigación realizada es posible concluir que la cavitación acústica es un fenómeno poco conocido y desarrollado, que esta comúnmente presente en la naturaleza, y que a pesar de lo complejo que pueda llegar a ser entender su funcionamiento, actualmente se puede generar de manera controlada y llevarla a las aplicaciones que sean necesarias.

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Figura 24. Señal de potencia de salida.

• Los limpiadores por ultrasonido comparados con otros métodos de limpieza, son realmente eficientes en cuanto a la cantidad de tiempo que necesita para obtener los resultados deseados.

• Para el óptimo desempeño de los transductores piezo eléctricos no basta conformarse con las características eléctricas dadas por el fabricante, es necesario realizar pruebas, para revisar su comportamiento luego de su acoplamiento al tanque, ya que la impedancia de resonancia de este se ve afectada de manera significativa.

• Los transistores presentan muchas perdidas en conducción y en conmutación, es algo que hay que mejorar en el diseño.

• pese a los esfuerzos, el transformador vibra al aplicar la señal, lo que hace que cambien de forma continua la frecuencia de resonancia del circuito resonante, esto saca al circuito de resonancia y baja considerablemente el valor de voltaje sobre la carga. Este es un segundo problema detectado en el diseño, el cual se debe mejorar, probablemente cambiando el núcleo por un toroide, o sumergiendo el núcleo en resina epóxica.

• Queda clara la necesidad de innovar en nuevos métodos de limpieza que ofrezcan mejores resultados, mayor eficiencia y menores costos, teniendo en cuenta que las condiciones salubres de las cosas son de vital importancia y prioridad.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en parte a través del CIDC, y en parte por la Facultad Tecnológica. Las opiniones expresadas en este artículo no necesariamente son compartidas por la Universidad Distrital. Los autores agradecen al grupo de investigación ARMOS por la discusión llevada a cabo sobre ideas y estrategias.

Referencias

ATCP Engenharia F i. (2016, enero). Trz analizador de transductores y sonotrodos (3.ª ed.) [Manual de software informático]. Descargado de `www.atcp.com.br`

Athira, S., y Deepa, K. (2014). Solar powered ultrasonic cleaner. En *Emerging research areas: Magnetics, machines and drives (aicera/icmmd), 2014 annual international conference on* (pp. 1–6).

Azhdast, M. H., Haleh, H., Pouladzadeh, P., Azhdast, A., y Soltanabadi, M. (2009). Theoretical and experimental analysis of beating and cavitation phenomenon on erosion in ultrasonic cleaning process. En *Advanced intelligent mechatronics, 2009. aim 2009. ieee/asme international conference on* (pp. 624–629).

Basa, K. M. C., Gomez, K. P. S., Navarro-Tantoco, F. B., Quinio, A. S., Arada, G. P., y Co, C. B. (2012). Design of a varying ultrasonic frequency amplifier. En *Tencon 2012-2012 ieee region 10 conference* (pp. 1–6).

Buasri, C., y Jangwanitlert, A. (2008). Comparison of switching strategies for an ultrasonic cleaner. En *Electrical engineering/electronics, computer, telecommunications and information technology, 2008. ecti-con 2008. 5th international conference on* (Vol. 2, pp. 1005–1008).

Cheng, H.-L., Cheng, C.-A., Fang, C.-C., y Yen, H.-C. (2011). Single-switch high-power-factor inverter driving piezoelectric ceramic transducer for ultrasonic cleaner. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, *58*(7), 2898–2905.

Fabijański, P., y Lagoda, R. (1996). Series resonant converter with sandwich-type piezoelectric ceramic transducers. En *Industrial technology, 1996.(icit'96), proceedings of the ieee international conference on* (pp. 252–256).

Green, A. (1993). Modelling a push-pull parallel resonant convertor using generalised state-space averaging. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, *140*(6), 350–356.

Harvey, G., Gachagan, A., y Mutasa, T. (2014). Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods. *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, *61*(3), 481–495.

Kauczor, C., y Frohleke, N. (2004). Inverter topologies for ultrasonic piezoelectric transducers with high mechanical q-factor. En *Power electronics specialists conference, 2004. pesc 04. 2004 ieee 35th annual* (Vol. 4, pp. 2736–2741).

Leighton, T. G., Birkin, P., y Offin, D. (2013). A new approach to ultrasonic cleaning. En *Proceedings of meetings on acoustics* (Vol. 19, p. 075029).

Martínez, F., Jacinto, E., y Castiblanco, M. (2013). Power factor corrector with pid loop fit by genetic algorithm. *Tecnura*, *17*(2), 10-17.

Mohan, N. (2009). *Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y dise no* (3.ª ed.) (n.º TK7881. 15. M64

2009.).

Niemczewski, B. (2014). Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics sonochemistry*, *21*(1), 354–359.

Niño, R., Mendez, S., Jorge, y Salas, L. (2010). *DiseÑo y construccion de un prototipo de cavitaci on ac ustica, con fines de limpieza industrial*. Tesis de Master no publicada, UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.

Peng, Q., Wang, H., Su, X., y Lu, X. (2008). A new design of the high-power ultrasonic generator. En *Control and decision conference, 2008. ccdc 2008. chinese* (pp. 3800–3803).

semiconductor, F. (2002, enero). *Data sheet irf840.* Descargado de `http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Datasheets/IRF840.pdf`

Tangel, A., Yakut, M., Afacan, E., Güvenc, U., y cols. (2010). An fpga-based multiple-output pwm pulse generator for ultrasonic cleaning machines. En *Applied electronics (ae), 2010 international conference on* (pp. 1–4).

CC BY NC ND

Revista Tekhnê
Enero - Junio 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 73– 82
© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL

Design and construction of a 6 DOF robotic arm

Diego N. Cuesta C.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
dncuestac@correo.udistrital.edu.co

Jeison R. Huerfano G.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jrhuerfanog@correo.udistrital.edu.co

Este artículo propone el diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL (6 DOF). El perfil de diseño (tamaño, capacidad de movimiento y tipo de interacción) sigue la linea de otros prototipos robóticos del grupo de investigación, en particular la mano robótica y sensores ópticos. La intención de este prototipo es que sirva como banco de practicas para comprobar el desempeño de esquemas de control. El prototipo se diseñó mediante software asistido por computador CAD, y para su construcción se uso una impresora 3D. Las pruebas de desempeño fueron orientadas a establecer sus limites funcionales.

Palabras clave: Actuadores, brazo robótico, CAD, control, GLD, modelado, planta robusta, prototipo

This paper proposes the design and construction of a 6 DOF robotic arm. Profile design (size, range of motion and interaction type) follows the line of other robotic prototypes of the research group, including robotic hand and optical sensors. The spirit of this prototype is to serve as test bank to check the performance of control schemes. The prototype was designed using CAD computer-aided software, and to build a 3D printer was used. Performance tests were designed to establish its functional limits.

Keywords: Actuators, CAD, control, DOF, modeling, prototype, robotic arm, robust plant

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016
Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756
Cómo citar: Cuesta, D. y Huerfano, J. (2016). *Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL.* Revista Tekhnê, 13(1), 73-82.

Introducción

En el diseño y construcción de brazos robóticos se cuenta con un gran número de modelos que se pueden clasificar en función de su aplicación. Esta se toma como punto de partida para su diseño y construcción. Otros elementos importantes de diseño es el control, modelado y simulación.

En el estudio de control se representa el sistema que se requiere modelar, por medio de bloques nombrados como: planta, control y sensorica, para facilidad del proceso, de tal modo estos elementos se conciben como la representación de un sistema, mas no se tiene certeza de la planta, en cierta medida esta es abstracta. Como por ejemplo, el uso dado en proyectos de control realizados a partir de brazos comerciales en los que se compra un modelo predefinido, como el Velleman KSR10, y en este se desarrolla el diseño de control. No obstante en este caso, se omite el proceso del diseño y construcción de una planta, siendo esta adaptada y no planificada, y que no ofrece una estructura que garantice el correcto posicionamiento y sujeción de los actuadores de forma optima.

Esta investigación se ha de desarrollado en tres etapas. En la primera etapa se ha definido la forma que tendrá el prototipo, pues esta condiciona las prestaciones y el campo de aplicación. Además, el mecanismo está restringido por aspectos como: alcance, carga máxima, peso entre otros. En este sentido, toma relevancia el uso de software asistido por computadora CAD, pues este dispone de herramientas de análisis estructural, que facilitan la construcción de un diseño, fiable, estético y funcional. De forma rápida, ahorrando tiempo y dinero (Rojas y Rojas, 2006). En esta etapa también se exploran los diversos materiales, disponibles en la impresión 3D, específicamente los polímeros como ABS, PLA, polianimida y policarbonato. Seleccionando el más adecuado, respecto a sus propiedades mecánicas, rigidez, y peso.

Una segunda etapa esta dada al proceso de fabricación de las piezas, por medio de una impresora 3D FlashForge Creator. Entre sus características más relevantes cabe destacar su resolución.Pues Imprime capas de hasta 50 micrones, es decir, hasta 20 capas por milímetro, lo que es importante al tener un volumen máximo de impresión de 23 x 15 x 15cm. Según estas características se construye, una estructura armable, que tiene como ventajas el transporte, y facilita la comprensión del prototipo (Flashforge, 2014).

En una tercera etapa se exporta el diseño de el brazo robótico en formato CAD, a un software de análisis matemático con el fin, de evaluar las propiedades cinético-funcionales del prototipo. Finalmente, una interfaz operada mediante microcontrolador Arduino le permite interactuar con un usuario, esto para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores del brazo robotico de 6 GDL (DOF, de su uso en inglés y literatura especializada *Degree Of Freedom*).

Marco Teorico

Como bien lo describe Echeverri en (Echeverri, 2014), el modelo dinámico tiene como objeto conocer las relaciones existentes entre el movimiento de el robot y las fuerzas aplicadas en cada articulación del brazo Robótico. Este estudio permite determinar el torque requerido en cada articulación, para que el manipulador logre movimientos sistemáticos hacia un objeto definido, Para tal fin se estudian en primera instancia las teorías que posicionan al brazo robótico en el espacio la cinemática directa y la cinemática inversa.

La cinemática directa, consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot, respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot La cinemática inversa, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas (Oramas, 2006).

Un método que facilita la solución de la cinemática Directa fue planteado por Denavit y Hartenberg en el año 1955, el cual consiste en fijar un sistema de coordenadas a cada articulación, mediante reglas fijas, después se relacionan los parámetros geométricos con el sistema de referencia a la siguiente articulación, esta relación se usa luego para describir una matriz de transformación Homogénea entre cada par de sistemas (Santos, Mejía, y Salazar, 2007).

De tal modo, son necesarias seis matrices homogéneas, una por cada grado de libertad del brazo robótico. El producto de estas genera una sola matriz de transformación T que relaciona el sistema, con el punto final objetivo del actuador, con el sistema de referencia escogido, un ejemplo del uso de esta metodología para un brazo de 7 GDL se ilustra en la Fig. 2.

La solución a la segunda problemática de cinemática inversa se logra mediante la separación de la posición y orientación del manipulador final, para ello se da una posición final arbitraria objetivo deseada, a partir de esta se establecen las coordenadas de los últimos tres ejes, y se obtiene el resto de variables articulares, por medio de una submatriz asociada a la matriz de transformación homogénea.

En este orden de ideas se resume, la teoría que posiciona al robot en el espacio, esta información es relevante al remplazarse en nuevas ecuaciones que representan el modelo dinámico. Dados los pares y las fuerzas que proporcionan los actuadores para que las variables articulares sigan una determinada trayectoria La ecuación que relaciona dichas variables está dada por:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q,\ddot{q}) + c(q) + F_v\dot{q} \tag{1}$$

Donde:

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

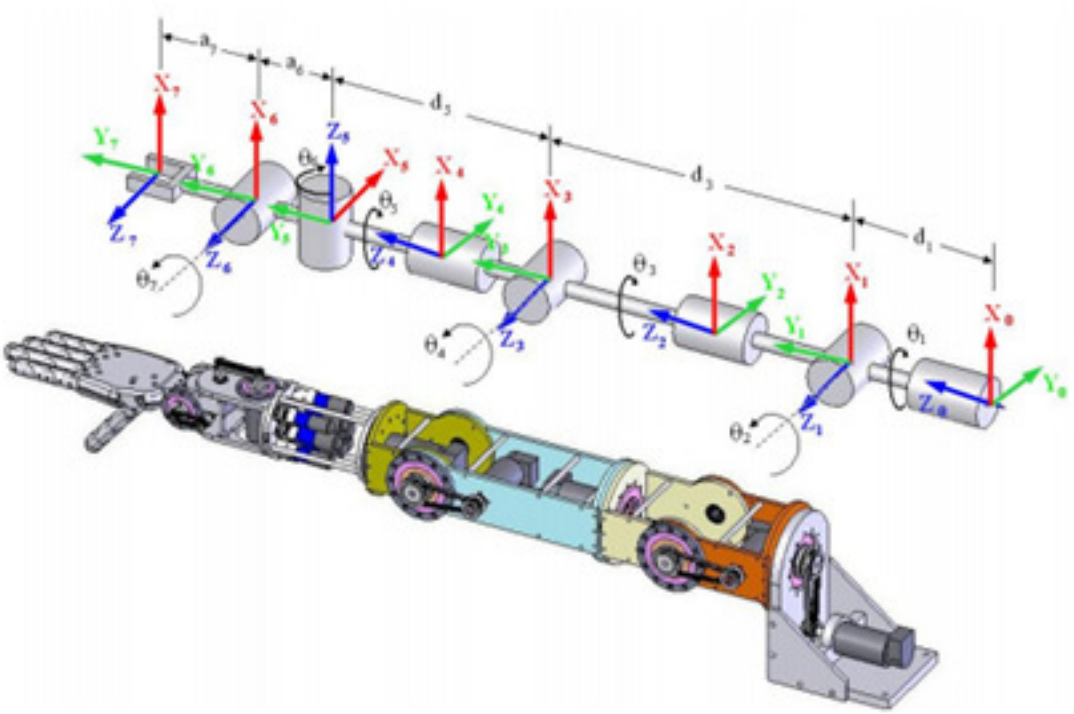


Figura 1. Representación de Denavit-Hartenberg del brazo robótico antropomórfico tomado de Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una Mano, Brazo y Antebrazo.

$D(q)\ddot{q}$ = Matriz de Inercias
$H(q,\ddot{q})$ = Es Matrix de aceleraciones centrifugas y de coriolis
$c(q)$ = Es la matriz de gravedad
$F_v\dot{q}$ =Es la matriz de rozamiento viscoso entre los pares

Sin embargo, si se evalúa detenidamente esta Ecuación, no es una expresión lineal, por lo que no es trivial encontrar a partir de ella el modelo dinámico que identifique la trayectoria del brazo. Por tanto para mayor facilidad se emplea la formulación Lagrangiana, está fundamentada en las consideraciones energéticas. Además el modelo se puede desarrollar únicamente para los 3 GDL que requieren vencer la fuerza de gravedad y las inercias de las masas, el hombro el codo y la muñeca, como se ilustra en la Fig. 2.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L\left(\theta,\dot{\theta}\right)}{\partial\dot{\theta}}\right]-\frac{\partial L\left(\theta,\dot{\theta}\right)}{\partial\dot{\theta}}=\tau_i i=1...n \qquad (2)$$

$L\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ Es el Lagrangiano definido como
$k\left(\theta,\dot{\theta}\right)-u(\theta)$

Donde:
- $k\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ Es la energía cinética.
- $u(\theta)$ Es la energía potencial.
- τ_i Son las Fuerzas Y pares.

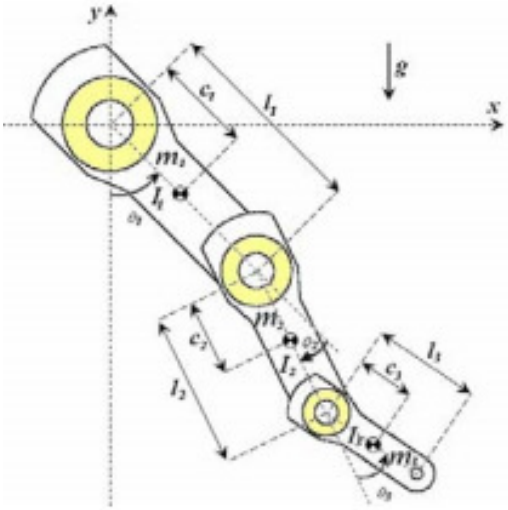


Figura 2. Método Lagrangiano para un robot de 3 GDL tomado de Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una Mano, Brazo y Antebrazo.

- n Es el numero de articulaciones del robot.

Para concluir, se han enunciado los métodos que determinan el posicionamiento del robot en el espacio la cinemática directa y la cinemática inversa y se ha enunciado

el método Lagrangiano, como herramienta para determinar el modelo en función del par, la velocidad y aceleración se obtiene mediante el método de matriz Jacobiana, necesario para determinar una velocidad constante en una trayectoria.

Diseño

El primer manipulador electro mecánico fue diseñado en 1969 por Víctor Scheinman en la Universidad de Stanford, constituido por eslabones y articulaciones que integran una cadena cinemática abierta. Que le permitían posicionarse en el espacio, este prototipo inicial, marco el inicio de investigaciones al uso de robots soldadores por arco eléctrico impulsado por la industria automotriz General Motors. Tal éxito se debe a su amplia maniobrabilidad, conseguida por su similitud al brazo humano (Almeida, 2009). En adelante se estudian las articulaciones que permiten tal capacidad.

El movimiento del brazo está dada por: Dos articulaciones principales, el hombro y el codo. El hombro se pude mover en dos planos, arriba y abajo, hacia tras y hacia adelante. Y el codo gracias a sus articulaciones es capaz de moverse, atrás y adelante arriba y abajo. Esta capacidad se llama Grados de libertad (GDL), siendo así, el hombro ofrece dos grados de libertad por sí mismo, rotación del hombro y flexión del mismo, la articulación del codo añade un tercer y cuarto grado de libertad. En total siete grados de libertad al brazo que le permiten moverse en cualquier dirección (Mosqueda, 2006).

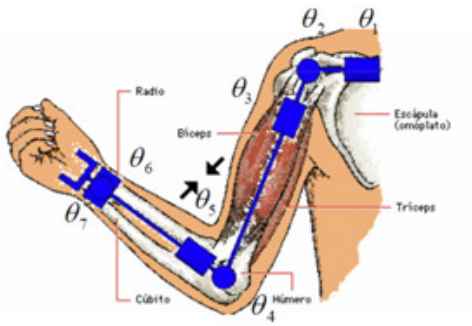


Figura 3. Grados de libertad brazo humano tomado de Modelación y Análisis de la Cinemática Directa e Inversa del manipulador Stanford de seis grados de libertad.

Es así que, para dotar el modelo con tal desplazamiento, se ha de construir con articulaciones, que permitan mayor grados de libertad según plantea (Romeo, 2001). En la base de el prototipo se ha de colocar una articulación una tipo cilíndrica, que permitirán (1 GDL), seguido el hombro estará dotado con una tipo rotacional que le permitirá moverse en 180 grados (1 GDL), esta trabajara en conjunto con la tercera articulación el codo (1 GDL), cumpliendo dos funciones, como punto de apoyo y extensión al antebrazo, quien finalmente soportara el actuador, con una última articulación tipo rotacional (1 GDL). De tal forma se suman (6 GDL). Para lograr el movimiento requerido.

Construcción

El modelo CAD que cumple con los 6 grados de libertad propuestos y de morfológica humana, se ilustra en la Fig. 4 y en la Fig. 5 un despiece detallado de cada sección, la tabla 1 resume las características físicas de las piezas.

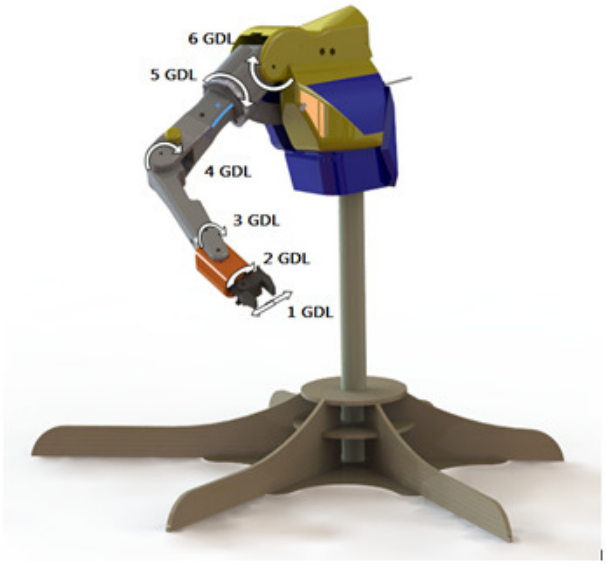


Figura 4. Modelo CAD. Fuente de los autores

El sistema se dividió en tres secciones, para su desarrollo La primera es: la muñeca comprende las piezas A-B. La pieza A cumple las veces de carcasa a un servomotor tipo MG996R Estándar de tensión nominal 6 V DC, cuenta con una caja de engranes en hierro lo que le permite cargas máximas hasta los 10 kg, este le otorga el primer grado de libertad al prototipo, mediante una pinza genérica para servo cuya extensión máxima es de 5 cm. El segundo GDL está dado al giro de la pinza en una extensión de 180 grados, completando la movilidad de la muñeca.

Esta configuración encaja en la pieza B, soporte y eje a un tercer grado de libertad, este ofrece mayor alcance interno al brazo de ajuste manual, la sección del antebrazo se compone de las piezas C-D, Y ofrecen soporte y eje de giro a la pieza E que hace las veces de codo, donde se ubica el cuarto GDL. Seguido se ensambla la pieza pieza F, esta es la armadura de un moto reductor marca Buhler, con capacidad de desarrollar 20 N/cm, energizado a 24 V, esta capacidad, esta multiplicada por una caja de engranes dispuesta en la tercera sección de el bíceps, las piezas G-H. Este vital mecanismo, eleva el torque en la pieza I el hombro, donde se dispone de otro motor Buhler, de iguales características,

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

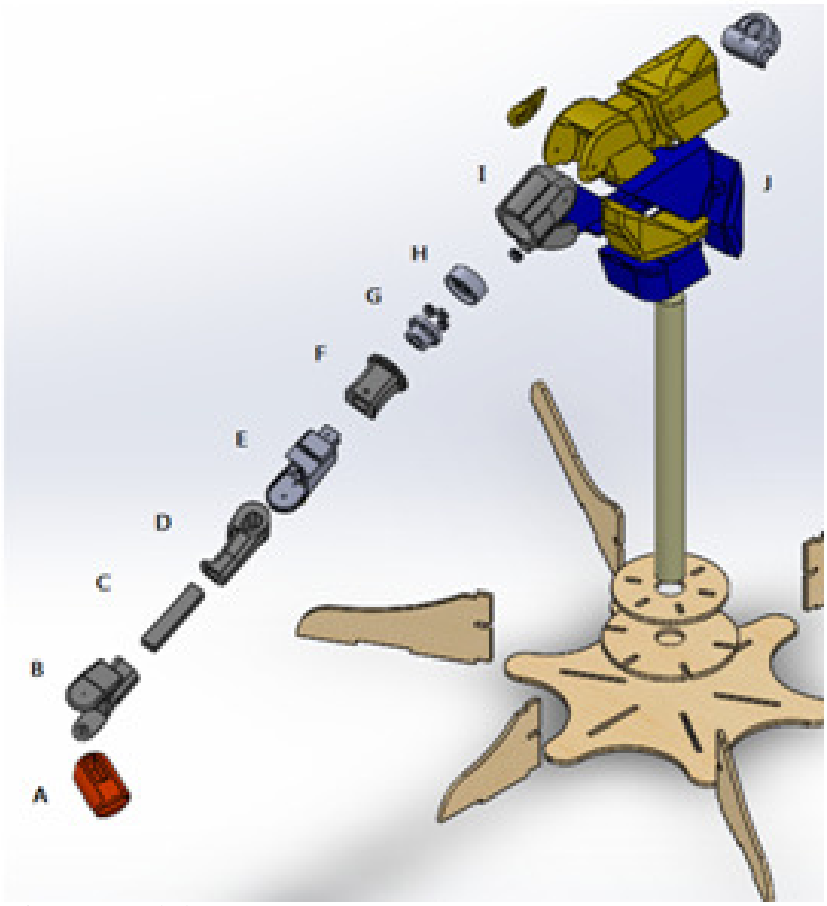


Figura 5. Despiece prototipo. Fuente de los autores

N0	pieza	Masa (grs)	Volumen (mm^3)	N0	pieza	Masa (grs)	Volumen (mm^3)
A	Muñeca	248.93	244048.06	F	Brazo	215.12	210899.72
B	Soporte Muñeca	320.2	313961.49	G	C Transmisión	59.79	54667.23
C	Unión	38.28	37529.70	H	Piñón hombro	30.40	30398.05
D	Antebrazo	226.29	221849.58	I	Hombro	614.30	6022559.01
E	Codo	275.43	49229.24	J	Pecho Y Abdomen	6881	8120153.48

Figura 6. Tabla 1: Características físicas de las piezas.

este se incorpora a una estructura ensamblada en el conjunto *j*, el pecho y abdomen, donde es relevante el aumento del volumen de las piezas, centralizando el punto de equilibrio de el modelo, esta finalmente se conecta a una base de forma pentagonal de cinco patas, ofreciendo la completa estabilidad del sistema.

Análisis estructural

La impresora 3D Flashforge Creator Dreamer es compatible con plásticos como el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (Poliácido láctico).

la elección del PLA como material a usar para la construcción de el brazo robótico de 6 GDL, responde a un

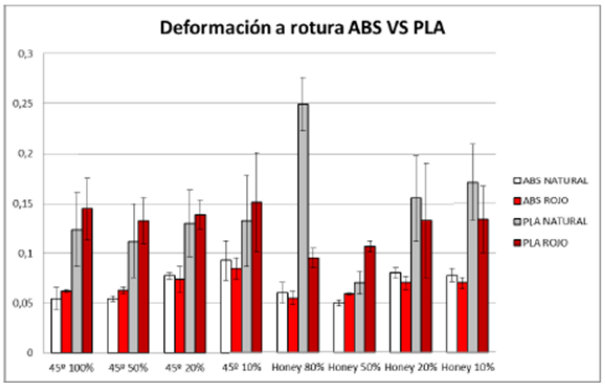


Figura 7. Comparación de la deformación para ABS y PLA natural y rojo tomada de estudio comparativo de piezas de ABS y PLA.

estudio entorno a las propiedades mecánicas de cada material de el cual se resumen las siguientes ventajas (Pastor, 2002).

El PLA tiene una densidad aproximada de 1.27 g/cc, lo que lo convierte en un material más pesado que el ABS, Su dureza Shore (escala que mide la dureza de los plásticos) es de grado 63.5, siendo mayor que la del ABS, Es decir es más rígido que el ABS, su módulo de elasticidad es de 3.63 GPa, lo cual dificulta su deformación ante cargas y lo hace un material menos elástico. Además su proceso de fabricación proviene de vegetales como el maíz, yuca, trigo, remolacha, y caña de azúcar lo que lo hace un material biodegradable, a diferencia de el ABS que se obtiene a partir de hidrocarburos (Castro, 2015).

Una vez seleccionado el material y conocidas sus propiedades mecánicas, se realiza un análisis estructural por medio de el software CAD, a dos piezas de el prototipo, El codo y la Muñeca estos se han seleccionado por que soportan la mayor parte de esfuerzos de el prototipo, el resultado de estos se observa en la Fig. 7 y la Fig. 8.

El análisis estructural desarrollado, se fundamenta en la teoría de fallas bajo cargas estáticas, su estudio comprende dos grupos, definidos según las propiedades de el material, dúctiles y frágiles, el PLA es un material dúctil, como se evidencia al observarlo experimentalmente este supera el 5 por ciento de su deformación antes de presentar fractura, bajo este concepto las pruebas de falla adecuadas para su estudio son Los ensayos de tensión Von Mises el cual establece que habrá falla de fluencia es decir de deformación, cuando los esfuerzos máximos absolutos , en un punto crítico superen la energía de distorsión por unidad de volumen (De Castro, s.f.).

Como se observa en la Fig. 7 el análisis de tensiones Von Mises para la pieza codo, para una tensión máxima de $6N/m^2$ resalta en color verde azulado los puntos críticos de posible falla por fluencia, evidentemente se contorna la unión de la pieza y el punto de eje de giro, entre los $5y6N/m^2$ Sin embargo estos puntos, no son significativos para causar daño a la estructura, debido a que la pieza codo E se ensambla dentro de las piezas *D* y *F* dando mayor apoyo estructural a la pieza.

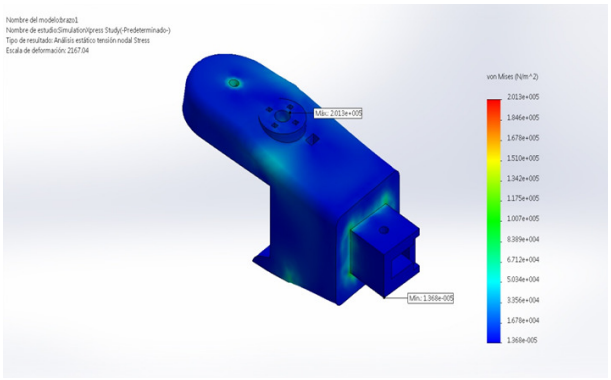


Figura 8. Análisis de fallas pieza D (CODO). Método tensión de Von Mises. Fuente de los autores

Seguido la pieza A muñeca, ofrece el 3 GDL, soportado en la pieza B, donde recae el peso del actuador y el objeto a desplazar, bajo este principio esta pieza consta de una figura cilíndrica que reparte el esfuerzo uniformemente en toda su extensión en color azul como se ilustra en la Fig. 8, los puntos críticos se acentúan en el eje de giro en un máximo $3{,}86N/m^2$ en color rojo.

Este criterio establece el peso máximo que el prototipo puede levantar sin sufrir daños mecánicos ni estructurales, máximo de 0.2 kg en una extensión de 1.57 m que ofrece el brazo, lo que se traduce en un torque de $3{,}14N/m$ aunque el brazo mecánicamente puede levantar mayor peso cercano a los 0.7 kg debido a sus actuadores los motores Buhler con capacidad de desarrollar $20N/m$, y una caja de engranes en una relación de 3 a 1 ubicada en el bíceps, de acuerdo al análisis estructural realizado, para evitar fallas estructurales por fluencia se ajusta este rango de seguridad.

Se sobredimensiona la fuerza del brazo robótico, a fin de garantizar completa compatibilidad de proyectos futuros del grupo de investigación, si se desea cambiar la pinza, por una mano semejante a la morfología humana, se recomienda sustituir desde la pieza A, para garantizar el correcto funcionamiento estructural del prototipo.

Análisis cinemático

Como se indica en el marco teórico, el modelo matemático con el que se representa el sistema, esta dado mediante una expresión, no lineal, por tal motivo no es trivial encontrar una representación, teórico- matemática del sistema fácilmente, sin embargo entre los objetivos de este proyecto, se encuentra el probar y garantizar el óptimo funcionamiento del brazo robótico de tal forma, se resuelve el análisis cinemático de el

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

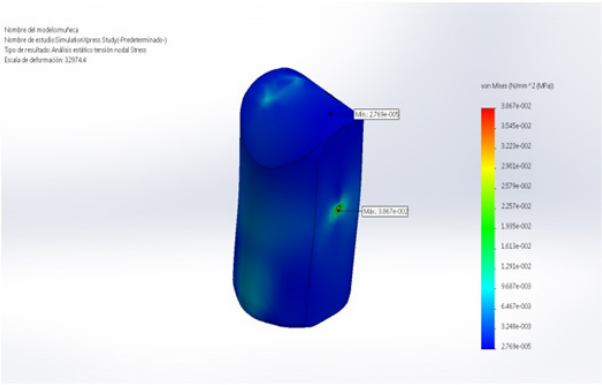


Figura 9. Análisis de fallas pieza pieza A muñeca. Método Tensión de Von Mises. Fuente de los autores

brazo, en base a la teoría de posicionamiento en el espacio de él algoritmo de de Denavit-Hartenberg.

Como valor agregado a este proyecto, se usa una interfaz gráfica de simulación, en la cual se puede visualizar el posicionamiento del prototipo, además esta cuenta con herramientas como: la evaluación y planificación de trayectorias, visualización de fuerzas pares y velocidad de las articulaciones, y lenguaje de programación industrial RAPID. Esto se logra mediante un conjunto de librerías de liciencia gratuita, llamada *A Robotics Toolbox For Education* (ARTE), construida a fines educativos, que facilita de forma interactiva el aprendizaje de la robótica, y la simulación de diseños teóricos de control.

Para lograr tal objetivo se enlazo, el modelo CAD del proyecto, el cual cuenta con todos los parámetros volumétricos y variables físicas del prototipo, masas, inercia, centros de masa, fricción, entre otras, a un código de programación, que representa fielmente el prototipo. Una vez exportado el modelo CAD a código de programación, este pude evaluarse mediante los comandos que ofrece la librería, de esta forma se aprovecha las herramientas que esta software libre ofrece. En la Fig. 9 se ilustra el Modelo cinemático mediante algoritmo de Denavit – Hartenberg. Para el brazo robotico de 6 GDL.

El interactuar con el modelo, es posible ejecutando el comando *steach*, en la librería, el cual proporciona un conjunto de botones, y barras deslizables que posibilitan el movilizar cada grado de libertad de el prototipo. El motor del software calcula estos movimientos y los procesa en el algoritmo cinemático, y visualiza las matrices de cinemática inversa y directa.

De esta forma se garantiza que el prototipo cumple con los 6 GDL planteados en los objetivos de el proyecto, además que el diseño se ha planteado de forma correcta, lo que permite exportarlo a un software matemático, que evalúa su optimo funcionamiento ante problemas de trayectorias cinemática diversa y directa.

Evaluación de desempeño

Una vez comprobado que el diseño cumple con los 6 GDL, y que se cuenta con toda la información el necesaria para desarrollar algoritmos de cinemática como el de Denavit - Hartenberg, se verifica el optimo funcionamiento de los actuadores, que otorgan los grados de libertad de el brazo robótico. Esto mediante un microcontrolador Arduino, una computadora y una interfaz gráfica, estructura que posibilita la comunicación de un usuario con el prototipo. En esta se visualizan los módulos que energizan los motores, y servomotores, ademas como parámetros de seguridad se establecen limites máximos a los movimientos, garantizando que el prototipo no colisione. Esto se da en la parte inferior izquierda de la interfaz mediante seis instrumentos análogos que informan acerca de la posición actual de el actuador, y la comparan con la posición deseada. Si dicha posición supera el rango de seguridad estipulado, se encenderán indicativos que alarman el limite de las posiciones máximas de cada articulación. Finalmente, en el centro de esta se da importancia a un botón de emergencia el cual se podrá activar en cualquier caso, desenergizando por completo el sistema (Fig. 11).

Seguido se analiza el par que recae sobre cada articulación, esto para comprobar que el par generado por cada motor es mayor, lo que le permite al prototipo moverse, y aun más importante establece el la carga máxima de el prototipo.

Como se ha recalcado en el documento estos esfuerzos son mayores en el hombro, el codo y la muñeca, de tal modo se gráfica par vs tiempo en cada una de estas articulaciones estas disponibles en la Figs. 12, 13 y 14.

A partir de estas se concluye que el torque que demanda cada articulación, es menor al torque generado por cada motor, y por tanto en el sistema se logra el movimiento, es decir estos satisfacen la demanda de el peso fricción y de mas variables de el prototipo, y una extra dada al desplazamiento de una carga, esto es posible gracias a que el par de el motor de el bíceps se potencia por una caja de transmisión de relación tres a uno.

En este orden de ideas se da por evaluado que el prototipo, cumple, con todas las características, tanto mecánicas como técnicas que permiten el realizar y comprobar diseños y teoría de control. Por tanto sirve como banco de pruebas y ensayos de investigaciones de el grupo ARMOS dando cumplimiento a todos los objetivos del proyecto.

Conclusiones

• El diseño del brazo de 6 GDL en base a morfología humana, es el punto de partida de una estructura, solida que garantiza el equilibrio del sistema, pues las fuerzas de

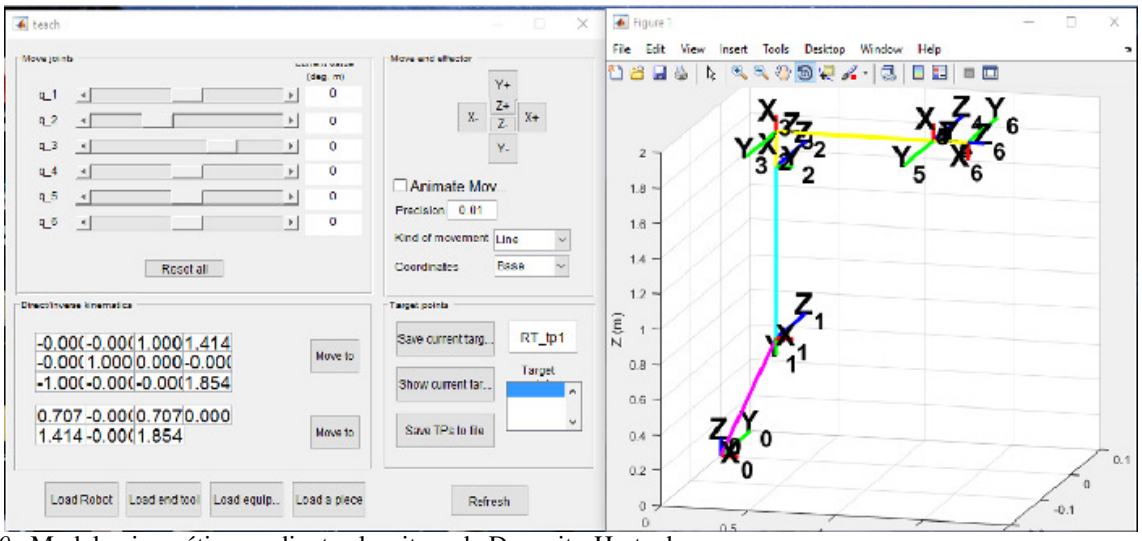


Figura 10. Modelo cinemático mediante algoritmo de Denavit - Hartenberg

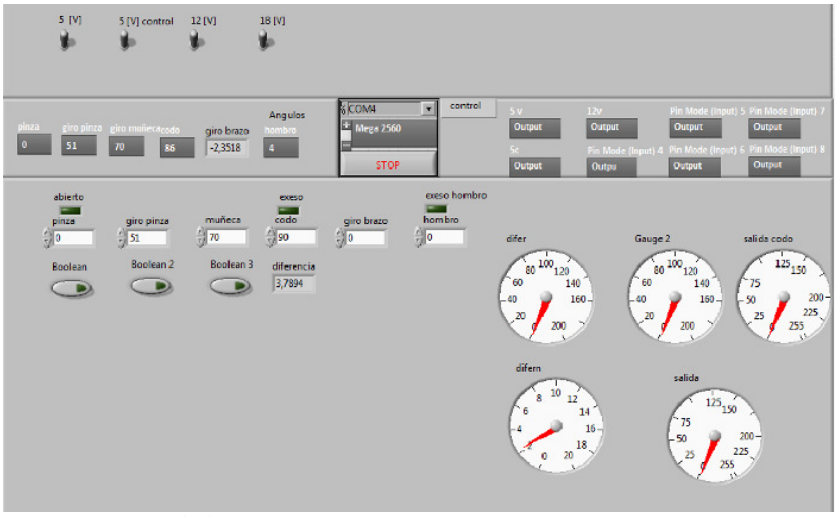


Figura 11. Interfaz de pruebas. Fuente de los autores

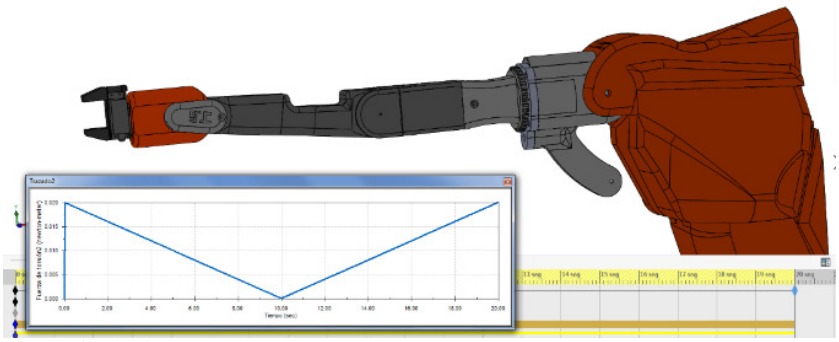


Figura 12. Par Vs Tiempo Articulación Hombro. Fuente de los autores

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN 1692-8407

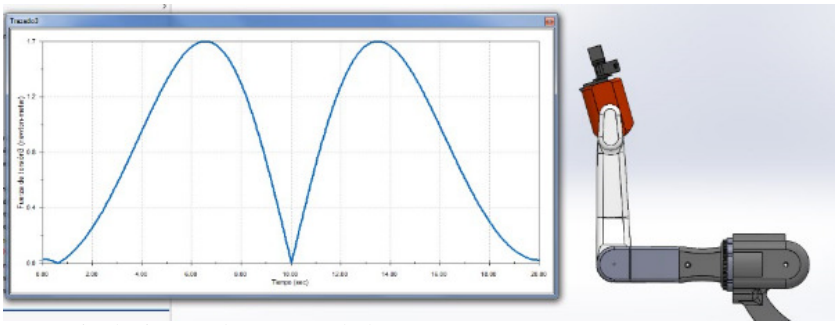


Figura 13. Par Vs Tiempo Articulación Codo. Fuente de los autores

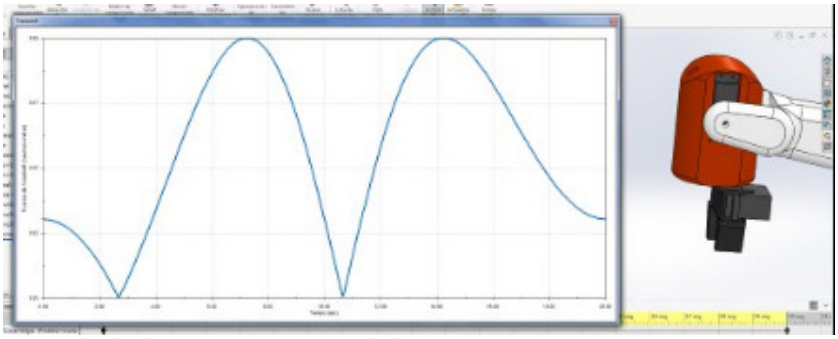


Figura 14. Par Vs Tiempo Articulación Muñeca. Fuente de los autores

los actuadores, y demás fuerzas externas, se conducen de manera uniforme a los soportes de la base Pentagonal de el suelo. Además dicha estructura soporta de manera adecuada los actuadores, y garantiza su optimo funcionamiento en conjunto con las piezas que participan en los movimientos.

• El materia plástico PLA Poliácido láctico, con el que fue construido el prototipo es el adecuado, pues ofrece la dureza necesaria, de acuerdo a los esfuerzos estudiados en el análisis estructural, y es totalmente compatible con la impresora 3D Flasforge Dreamer Creator, la cual ofrece la precisión necesaria, ala construcción de piezas ligeras y compactas por ajustes finos, facilitando el armado y desarmado y desplazamiento de el prototipo.

• El diseño CAD, cuenta con la información necesaria, volumen, peso, fricción, torque de el modelo dinámico de el sistema, lo que posibilita, el exportar el modelo a software matemático en el que se pueden evaluar problemáticas de trayectorias y cinemática inversa y directa, lo que es de gran importancia al ofrecer un banco de ensayos a fines educativos. ya que posibilita el uso de la librerías libres como (Arte) *A Robotics Toolbox For Education*, la cual desarrollada herramientas que facilitan la comprensión y programación de manipuladores robóticos.

• Los motores y servomotores ofrecen una respuesta adecuada, respecto al par que demanda la estructura, posibilitando los movimientos, en los cuales la velocidad no es un factor relevante, ya que la caja de transmisión de relación tres a uno dispuesta en el bíceps, se disminuye velocidad y se aumenta momento torsor, lo que es necesario al desplazar un objeto no mayor a 200 gramos según los resultados de las pruebas estructurales y la evaluación de desempeño.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en parte a través del CIDC, y en parte por la Facultad Tecnológica. Las opiniones expresadas en este artículo no necesariamente son compartidas por la Universidad Distrital. Los autores agradecen al grupo de investigación ARMOS por la discusión llevada a cabo sobre ideas y estrategias.

Referencias

Almeida, G. (2009). *Fundamentos Generales De La Robotica* (Inf. Téc.). Descargado de `http://guillermoalmeida.wikispaces.com/file/view/UNIDAD+I+ROBOTICA+2009.pdf`

Castro, M. (2015). *Pla. Material, Interés y Consejos De Impresión.* Descargado de `http://www.dima3d.com/pla-material-interes-y-consejos-de-impresion-3/`

De Castro, A. (s.f.). *Teorías De Falla Bajo Cargas Estáticas* (Inf. Téc.). Descargado de http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Teorasdefallabajocargasestticas.pdf

Echeverri, A. (2014). *Análisis Cinemático Y Dinámico Del Robot Scorbot Er Vplus Para La Nueva Configuración En Una Base Deslizante*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad Tecnológica De Pereira.

Flashforge. (2014). *Dreamer La Más Moderna de las Impresoras 3D de Flashforge.* Descargado de http://www.imprimiren3d.com.mx/

Mosqueda, J. (2006). *Biomecánica de las palancas musculares* (Inf. Téc.).

Oramas, M. (2006). *Modelación Y Análisis De La Cinemática Directa E Inversa Del Manipulador Stanford De Seis Grados De Libertad*. Tesis Doctoral no publicada, Escuela Politécnica Nacional.

Pastor, A. (2002). *Estudio comparativo de piezas de abs y pla procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad Carlos III De Madrid.

Rojas, O., y Rojas, L. (2006). Diseño Asistido Por computador. *Industrial Data*, *9*, 6–15.

Romeo, A. (2001). *Morfología de los robots industriales* (Inf. Téc.).

Santos, C., Mejía, F., y Salazar, A. (2007). *Diseño De Un Sistema Emulando El Movimiento Articulado De Una Mano, Brazo Y Antebrazo*. Tesis Doctoral no publicada, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

CC BY NC ND

Instrucciones para los autores

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

Alcance y política editorial de la revista

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

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

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

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

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 Colciencias), los cuales se caracterizan por presentar resultados originales de proyectos terminados de investigación, con secciones claramente diferenciadas de introducción, metodología, resultados y conclusiones. Otro tipo de artículos como los denominados de reflexión, revisión, artículos cortos o reportes de casos no son aceptados, y serán rechazados por el Comité Editorial sin surtir proceso alguno de evaluación.

Formato del manuscrito

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

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

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

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

Formato de publicación

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

Cambios en la edición

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

Envío de manuscritos

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

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

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

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

El proceso de envío consta de tres etapas:

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

Proceso de publicación

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

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

Contacto

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse con:
Prof. Fredy H. Martínez S.
Editor y director revista Tekhnê
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 301
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A-35 sur
Teléfono: (571) 3238400 Ext. 5003
Celular: (57) 3005585481
Bogotá D.C., Colombia
E-Mail: tekhneud@udistrital.edu.co
Url: http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/index

Instructions for authors

T e k h n ê

Tecnología al servicio de la sociedad

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Tekhnê journal
District University Francisco José de Caldas
Technological Faculty

Outreach and publishing policy journal

The ***Tekhnê*** journal is an institutional journal of the Technological Faculty of District University Francisco José de Caldas (Colombia). It is arbitrated, and accepts original articles in the field of engineering, technology and applied sciences on the condition that they are the product of research work. Since its first issue in 2003 the journal has maintained its regularity.
It has a scientific-academic nature and attends the specialist national and international community in the areas of electrical, electronics, mechanical, systems, industrial and civil engineering. Publishes research results in Spanish or English (original and unpublished articles), and is fully open to experts from around the world as authors and/or readers. It is arbitrated by a double-blind process, with continuous rotation of evaluators.
The ***Tekhnê*** journal has twice a year periodicity, coinciding with the academic semesters of the District University. The publication is made in June and December each year. The evaluation process of the papers submitted for publication includes a stage of initial acceptance by the Editorial Committee, which verifies compliance with the editorial parameters and an evaluation by academic peers through a double blind process. The time taken to decide on the acceptance of a paper never exceeds six (6) months from the date of receipt.
The ***Tekhnê*** journal is committed to high ethical standards and take possible measures to avoid bad practices such as fraud and plagiarism. All authors must declare that their manuscripts are original, unpublished and of his own, needed condition to be considered by the Editorial Committee. The ***Tekhnê*** journal also is committed to ensuring a fair, objective and quick review of manuscripts both referees as by the Editor. The authors recognize that they have disclosed any actual or potential conflict of interest with their work or partial benefits associated through the transfer of rights.

Types of articles accepted

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

Manuscript format

Regarding the structure, should be evident the sections of introduction, methodology, results, conclusions and references. The rest of the document must conform in accordance with its contents. The length should not exceed 25 pages in full. In the initial part of the first page should include: (1) A manuscript title (in Spanish and English), short, descriptive of the content and attractive to the reader. (2) Full name of the authors and institutional affiliation details, including email. (3) Abstract (in Spanish and English) of the manuscript with a maximum size of 250 words, which set the objective, methodology, results and major conclusions. (4) Keywords, up to five, lowercase and separated by commas.
Regarding the document format requested, authors are asked not to use styles of word processors. The manuscript must be on a column, single space between lines of text without space between paragraphs and between titles and text. Must be selected letter size paper (21 cm wide by 29.7 cm long) vertically. Margins should be 2 cm on all sides (left, right, up and down). Must be used Times New Roman (if the font is not available, use a similar serif type) without reducing character spacing, of 12 points. No articles including letters, words or symbols handwritten in the text will be accepted. Tables and figures should be clear, inserted (not pasted) in the document as a single object (no grouping of several) with the highest possible quality. It is requested that these figures are sent in a separate zipped file. If lines or color figures are used, you should not to use light colors (yellow, light blue...). The Editor reserves the right to remove any figure or table that does not meet the standards. Every figure, table, equation or references in the manuscript should be referenced/cited in the document body. Should not be indented any section of the article. References should handle right APA format 6th Edition. Do not use footnotes, and maximum to use three levels for titles. You can include an Acknowledgments section (highly recommended), written soberly, of no more than four lines, right after the Conclusions.
Regarding the source file format, you can use any word processor, as long as the content is complete and editable (*.txt files are not allowed). Recommended formats are: *.rtf, *.doc, *.docx, *.odt, *.wpd y *.tex. When using LaTeX, the author must submit all source files. In all cases, the authors must submit, along with the images, a BibTeX file (a single *.bib file) with all references used, each reference with a single key. This file can be generated from reference managers like Mendeley and Zotero, or generated with tools such as JabRef.
Regarding the language and style of writing, the author must use simple sentences and avoid regionalisms. He must take special care to use the correct spelling and writing, according to the rules of language.

Publication format

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

Editing changes

The Editor reserves the right, and is accepted by the author(s) with the only article shipping, to make changes in order to achieve a better presentation and impact of the work. These modifications may include changes in the title, abstract, keywords,